



Gonçalo Emanuel Pacheco de Almeida

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

**Simulação Numérica e Avaliação
Experimental do Desempenho de Sondas
Inovadoras de Correntes Induzidas em
Diferentes Materiais e Defeitos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Presidente: Rosa Maria Mendes Miranda, Professora Doutora, FCT-UNL

Arguente: Pedro Miguel dos Santos Vilaça da Silva, Professor Doutor, IST-UTL

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor Doutor, FCT-UNL

Co-orientador: Luís Granadeiro Rosado, Professor Doutor, IST-UTL



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Dezembro 2012

Gonçalo Emanuel Pacheco de Almeida
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Simulação Numérica e Avaliação Experimental do Desempenho
de Sondas Inovadoras de Correntes Induzidas em Diferentes
Materiais e Defeitos**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa para obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Mecânica

Dezembro 2012

SIMULÇÃO NUMÉRICA E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE SONDAS INOVADORAS DE CORRENTES INDUZIDAS EM DIFERENTES MATERIAIS E DEFEITOS

Copyright @ Gonçalo Emanuel Pacheco de Almeida, FCT /UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Os meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador Professor Doutor Telmo Santos, pela ajuda prestada e pelo empenho nos esclarecimentos das inúmeras dúvidas que me permitiram a conclusão deste trabalho.

Ao meu co-orientador Eng.º Luís Rosado do IST-UTL, agradeço igualmente o acompanhamento e a solicitude prestada em vários domínios do trabalho.

Uma grande palavra de apreço ao meu colega e amigo Eng.º João Gonzalez, pela constante disponibilidade e pela preciosa ajuda que me deu ao longo de todo o trabalho.

Agradeço aos meus colegas de curso e grandes amigos Francisco Alho, Nuno Pinto e Tiago Joaquim, que sempre me acompanharam nos bons e maus momentos deste trajecto, e que ao partilhar comigo as suas ideias, experiências, opiniões e dificuldades, contribuíram fortemente para o meu desenvolvimento pessoal e intelectual e me ajudaram a ultrapassar inúmeras dificuldades com que me deparei ao longo destes anos.

E a todos os outros que de alguma maneira me acompanharam e ajudaram nos momentos bons e menos bons desta fase da minha vida.

Aos meus familiares, pela sua constante presença, amizade e apoio, que à sua maneira também contribuiu decisivamente para a realização deste trabalho.

O maior agradecimento fica para os meus pais, pelo apoio e amizade que me transmitem diariamente, pelo esforço e sacrifício que sempre me dedicaram e especialmente por serem o que são.

RESUMO

Nos últimos anos, desenvolvimentos nos END por Correntes Induzidas conduziram a uma sonda inovadora designada *IOnic Probe*. Esta sonda tem demonstrado bom desempenho na detecção de micro-defeitos superficiais, nomeadamente na Soldadura por Fricção Linear (SFL). Recentemente, alguns parâmetros geométricos foram otimizados, tendo em vista aumentar a eficácia na detecção de defeitos. Desta optimização resultaram novas configurações geométricas da sonda. No entanto, a sua aplicação tem estado restrita a defeitos padrão em alumínio e à SFL.

O objectivo deste trabalho foi estender a aplicação da sonda a outros materiais e a outras morfologias de defeito, tendo em vista avaliar o seu desempenho comparativamente às sondas convencionais.

Foram produzidos defeitos artificiais paralelos à superfície, matrizes de furos e juntas bimetálicas em vários materiais de engenharia, nomeadamente nos aços AISI 1012 e AISI 304, alumínio AA1100, AA5083-H12 e AA6061-T6, ferro fundido GG25, cobre electrolítico, grafite e em GLARE®. Foram desenvolvidos e produzidos dispositivos de movimentação automatizada de sondas. Foram realizados ensaios experimentais com diferentes sondas *IOnic* e convencionais, e os resultados foram comparados com os resultados de simulações numéricas.

Os ensaios mostram que a sonda *IOnic* apresenta uma boa sensibilidade comparativamente às sondas convencionais na detecção de quase todos os defeitos e material. Concluiu-se também que a sua capacidade de detecção de defeitos em profundidade é em muitos casos superior à das sondas convencionais, nas mesmas condições de inspecção.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio Não Destrutivo (END)

Correntes Induzidas (CI)

IOnic Probe

Defeitos

ABSTRACT

Recent developments in NDT led to a new eddy currents probe designated *IOnic* Probe. This probe has shown good performance in detecting micro-superficial defects, particularly in Friction Stir Welding (FSW). Recently, some geometric parameters were optimized in order to improve effectiveness in defects detection. And optimized geometrical configurations of the probe were designed. However, its application has been restricted to artificial aluminum defects and to FSW.

The purpose of this study was to extend the application of the probe to other materials and other defect morphologies in order to evaluate *IOnic* Probe performance compared to conventional probes.

Artificial defects parallel to the surface, matrixial holes disposition and bimetallic joints in various materials, particularly in AISI 1012 and AISI 304, aluminum AA1100, AA5083-H12 and AA6061-T6 cast iron GG25, annealed copper, graphite and GLARE ® were produced. Automated probe's handling and positioning devices were developed and produced. Experimental tests were performed with different *IOnic* and conventional probes, and the results were compared with the results of numerical simulations.

The tests results show that the *IOnic* probe has greater sensitivity than conventional probes in detecting almost all the defects, on any material. It was also found that the ability to detect defects in depth in many cases is higher than that of conventional probes, under the same inspection conditions.

KEY-WORDS

Non-Destructive Testing (NDT)

Eddy Currents (EC)

IOnic Probe

Defects

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xxiii
NOMENCLATURA	xxv
Nomenclatura Romana	xxv
Nomenclatura Grega.....	xxv
SIGLAS	xxvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Estado da Arte e Motivação	1
1.2 Resumo Alargado	2
1.2.1 Objectivos Tecnológicos e Científicos	2
1.2.2 Trabalhos Realizados.....	3
1.2.3 Resultados Obtidos e Conclusões.....	4
1.3 Estrutura da Tese	4
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Ensaios Não Destrutivos (END).....	8
2.3 Correntes Induzidas (CI)	8
2.3.1 Fundamentos do Método END por CI.....	9
2.3.2 Limitações do Método	11
2.4 Variantes do Método e de Sondas	11
2.4.1 Sondas Convencionais (axissimétricas e helicoidais).....	11
2.4.2 Correntes Induzidas Pulsadas	13
2.4.3 Sonda “ <i>IONic</i> Probe”	13

2.5	Síntese do Capítulo	18
3	DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS	21
3.1	Introdução	21
3.2	Descrição das Condições de Defeito.....	22
3.2.1	Caracterização e Descrição de Materiais Base.....	22
3.2.2	Descrição de Defeitos e Condições de Inspeção	24
3.3	Dispositivos de Locomoção, Posicionamento e Fixação da Sonda	32
3.3.1	Suporte para Sondas.....	33
3.3.2	Mesa Delta	34
3.3.3	Mesa Alpha	35
3.4	Descrição da Sonda de CI e Equipamento Electrónico.....	37
3.4.1	Descrição e Caracterização das Sondas	37
3.4.2	Dispositivos Electrónicos Dedicados Para a Sonda <i>IONic</i>	43
3.4.3	<i>Software</i> LabVIEW.....	45
3.4.4	Equipamento OLYMPUS (Nortec 500).....	45
3.5	Síntese do Capítulo	46
4	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	47
4.1	Introdução	47
4.2	Descrição do Modelo de Simulação.....	48
4.3	Juntas Bimetálicas.....	52
4.4	Defeitos em Profundidade.....	57
4.5	Defeitos Paralelos à Superfície	60
4.6	Síntese do Capítulo	62
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
5.1	Introdução	63
5.2	Resultados Experimentais em Juntas Bimetálicas	64
5.2.1	Sonda Convencional (<i>Pencil Probe</i>).....	64
5.2.2	Sondas <i>IONic</i>	65
5.3	Resultados Experimentais em Defeitos em Profundidade	68

5.3.1	Efeito do Diâmetro do Furo.....	68
5.3.2	Efeito do <i>Offset</i> de Furo no Sinal da Sonda.....	70
5.3.3	Inspecções de Topo	73
5.3.4	Inspecções de Base com a Sonda <i>Pencil Probe</i>	74
5.3.5	Resultados das Inspecções de Base com a Sonda #2.....	82
5.3.6	Resultados das Inspecções de Base com a Sonda #11.....	86
5.3.7	Resultados das Inspecções de Base com a Sonda #12.....	91
5.3.8	Resultados das Inspecções de Base com a Sonda #13.....	95
5.3.9	Resultados das Inspecções de Base com a Sonda #14.....	99
5.3.10	Resultados das Inspecções de Base com a Sonda AB4	103
5.3.11	Resultados das Inspecções de Base com a Sonda <i>IONic</i> Bobina	107
5.3.12	Síntese de Resultados das Inspecções de Base	116
5.4	Comparação entre a Sonda <i>IONic</i> com uma e duas camadas de Bobinas Sensíveis.....	118
5.5	Resultados para Defeitos Paralelos.....	118
5.5.1	Resultados <i>Pencil Probe</i>	118
5.5.2	Resultados Sonda #11.....	120
5.5.3	Resultados Sonda #12.....	121
5.5.4	Resultados Sonda AB4	122
5.5.5	Resultados <i>IONic</i> Bobina	123
5.6	Aplicação da Sonda <i>IONic</i> à SFL em Ligas AlMgSc	124
5.7	Síntese do Capítulo.....	126
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	129
6.1	Introdução.....	129
6.2	Conclusões.....	130
6.3	Propostas Para Desenvolvimentos Futuros.....	131
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
	ANEXOS.....	I
A1 -	Desenhos Técnicos dos Componentes do Suporte de Sondas	III
A1.1	Travão do Guia Linear.....	III

A1.2	Base de Suporte.....	V
A1.3	Garfo	VII
A1.4	Bloco para Rolamentos	IX
A1.5	Copo.....	XI
A1.6	Tampa	XIII
A2 -	Desenhos Técnicos dos Componentes da Mesa Delta	XV
A2.1	Apoio da Correia.....	XV
A2.2	Apoio do Encoder	XVII
A2.3	Base.....	XIX
A2.4	Fixador Fita Esquerdo.....	XXI
A2.5	Suporte Ficha de 9 Pinos.....	XXIII
A3 -	Desenhos Técnicos dos Componentes da Mesa Alpha	XXV
A3.1	Base.....	XXV
A3.2	Espelho Vertical.....	XXVII
A3.3	Suporte do Motor	XXIX
A3.4	Suporte do Barramento Vertical	XXXI
A3.5	Suporte do Fim de Curso	XXXIII
A3.6	Suporte do Motor Vertical	XXXV
A4 -	Resultados dos Ensaios a Defeitos em Profundidade	XXXVII
A4.1	Inspecções de Topo.....	XXXVII
A4.2	Inspecções de Base.....	XXXIX
A5 -	Resultados dos Ensaios a Defeitos Paralelos	XLIX

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Princípio do método de END por CI [5].	10
Figura 2.2 - Plano de resposta da impedância das CI [3].	10
Figura 2.3 – Exemplo de sonda convencional com configuração em ângulo recto [5].	12
Figura 2.4 - Funcionamento da sonda: (a) Modo absoluto; (b) modo diferencial [3].	12
Figura 2.5 - Representação esquemática das correntes e campos nas sondas <i>IONic</i> e convencionais [3].	14
Figura 2.6 – Princípio de funcionamento da sonda <i>IONic</i> : a) Sonda no ar, b) Sonda sobre material homogéneo, c) Sonda sobre defeito [1].	15
Figura 2.7 – Circulação das CI em defeitos superficiais: a) Sonda axissimétrica junto de defeito paralelo, b) Sonda axissimétrica junto de defeito perpendicular, c) Sonda <i>IONic</i> junto de defeito paralelo e d) Sonda <i>IONic</i> junto de defeito perpendicular [3].	16
Figura 2.8 - Representação esquemática do método de inspecção com movimento de rotação da sonda a 360° [1].	17
Figura 3.1 - Imagem dos provetes realizados: a) chapas com matrizes de furos a vermelho; b) blocos para juntas bimetalicas, a verde; e c) blocos com defeitos paralelos, a amarelo.	22
Figura 3.2 - Junta bimetalica Al – Aço – Al, no acto de inspecção.	25
Figura 3.3 – Provetes para juntas bimetalicas: a) provete em cobre; b) provete em aço; c) provete em alumínio.	25
Figura 3.4 - Representação esquemática das duas condições de inspecção realizadas: a) Inspeção de Base; b) Inspeção de Topo.	26
Figura 3.5 - Esquema da Chapa 1: a) numeração das linhas e respectiva direcção de inspecção; b) imagem da chapa 1; e c) vista em corte da linha 6 (L6).	27
Figura 3.6 – Esquema da chapa 6 (aplicado também a todos os provetes onde não existe variação de diâmetro): a) numeração das linhas e respectiva direcção de inspecção; e b) imagem da chapa 5.	28
Figura 3.7 – Vista em corte exemplificativa dos furos realizados nos provetes para avaliação de defeitos em profundidade: a) macrografia e demonstração do processo de medição; b) micrografia do furo e esquema da profundidade média alcançada pelo fio durante a medição.	28
Figura 3.8 - Blocos com defeitos paralelos; a) Bloco1; b) Bloco2; c) Bloco3.	29
Figura 3.9 – Bloco 1 visto em perspectiva.	30
Figura 3.10 – Bloco 2 com a indicação da linha de defeito.	30

Figura 3.11 – Bloco 3: a) vista lateral com a indicação da linha de defeito; b) superfície do bloco e linhas de inspecção; e c) vista de trás do bloco onde se observa o afastamento gradual do defeito.	31
Figura 3.12 – Dispositivos de locomoção e posicionamento desenvolvidos. a) Representação esquemática em desenho 3D da Mesa Delta; b) Representação esquemática em desenho 3D da Mesa Alpha; c) Fotografia da Mesa Delta; d) Fotografia da Mesa Alpha.	33
Figura 3.13 - Nova configuração do suporte das sondas. a) Representação esquemática em desenho 3D do suporte das sondas; b) Foto do suporte das sondas.	34
Figura 3.14 – Vistas em perspectiva da modelação da mesa Delta no <i>software</i> SolidWorks.....	35
Figura 3.15 - Mesa Alpha: a) modo de inspecção a provetes de grande dimensão; b) modo de inspecção a provetes de dimensão reduzida; c) esquema de inspecção a 45° de cordão de SFL... ..	36
Figura 3.16 – Mesa Delta com suporte de sondas Pencil Probe. a) Chapa de suporte; b) Conjunto de fixação da sonda.	39
Figura 3.17 – Interface gráfica do utilizador do <i>software</i> LabVIEW.	39
Figura 3.18 – Mesa Delta em inspecção com indicação da direcção de inspecção (a vermelho)..	42
Figura 3.19 – <i>Hardware</i> dedicado <i>IONIC</i>	44
Figura 3.20 - Interface gráfica de controlo do sistema de END: a) Área de configuração dos parâmetros de teste; b) Gráfico 1D do sinal real e imaginário; e c) C-Scan.	45
Figura 3.21 – Equipamento de END convencional: a) Nortec 500; e b) Aparato laboratorial.	46
Figura 4.1 - Modelo geométrico do provete de furos para a sonda AB4.	48
Figura 4.2 – Modelo de geométrico de MEF: a) para juntas bimetálicas com a sonda AB4; b) para juntas bimetálicas com a sonda #12.	49
Figura 4.3 - Modelo geométrico do provete para a sonda #12, com volume de material envolvente com as características eléctricas do ar.....	50
Figura 4.4 – Elementos de malha dos modelos geométricos: a) malha com 830.000 elementos para sonda AB4; e b) malha com 1.610.000 elementos para sonda #12.....	50
Figura 4.5 – Pormenor de modelo geométrico com bloco de 50 µm entre na junta bimetálica.....	51
Figura 4.6 - Modelo geométrico para defeitos paralelos.....	51
Figura 4.7 – Modelos geométricos de simulação de juntas bimetálicas: a) junta Al – Cu – Al; b) junta Al – Aço – Al.....	53
Figura 4.8 – Deslocamento da sonda #12 na junta bimetálica sem defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz	54
Figura 4.9 - Deslocamento da sonda #12 na junta bimetálica sem defeito Al – Cu - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz.	54
Figura 4.10 - Deslocamento da sonda AB4 na junta bimetálica sem defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz	54

Figura 4.11 - Deslocamento da sonda #12 na junta bimetalica com defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz	55
Figura 4.12 - Deslocamento da sonda #12 na junta bimetalica com defeito Al – Cu - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz	56
Figura 4.13 - Deslocamento da sonda AB4 na junta bimetalica com defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz	56
Figura 4.14 - Comparação do sinal do deslocamento da sonda #12 na junta bimetalica com defeito e sem defeito Al – Cu - Al à frequência de 1000 kHz.....	57
Figura 4.15 – Comparação do sinal do deslocamento da sonda AB4 na junta bimetalica com defeito e sem defeito Al – Aço - Al à frequência de 1000 kHz.....	57
Figura 4.16 – Resultado numérico da sonda #12 ao atravessar um defeito a 100 µm de profundidade, para os diâmetros de furo D0.5, D1 e D2 @ $f = 200$ kHz.	58
Figura 4.17 - Resultado numérico da sonda AB4 ao atravessar um defeito a 100 µm de profundidade, para os diâmetros de furo D0.5, D1 e D2 @ $f = 200$ kHz.	58
Figura 4.18 - Resultado numérico da sonda #12 a atravessar um defeito D1 a 100 µm de profundidade @ $f = 200, 1000$ e 5000 kHz.	59
Figura 4.19 – Resultado numérico da sonda AB4 a atravessar um defeito D1 a 100 µm de profundidade @ $f = 200, 1000$ e 5000 kHz.	59
Figura 4.20- Resultado numérico da sonda #12 a atravessar um defeito D0.5 a 100, 200, 300, 400 e 500 µm de profundidade, @ $f = 200$ kHz.	60
Figura 4.21 - Resultado numérico da sonda AB4 a atravessar um defeito D0.5 a 100, 200, 300, 400 e 500 µm de profundidade, @ $f = 200$ kHz.	60
Figura 4.22 - Deslocamento da sonda #12 com o defeito paralelo a 50, 100 e 150 µm da superfície à frequência de 200 kHz.	61
Figura 4.23 - Deslocamento da sonda AB4 com o defeito paralelo a 50, 750 e 1050 µm da superfície à frequência de 5000 kHz.	61
Figura 5.1 – Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre a junta Al – Cu – Al, @ 100, 200, 500, 1000 e 2000 kHz.	64
Figura 5.2 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre a junta Al – Aço – Al, @ 100, 200, 500, 1000 e 2000 kHz.	64
Figura 5.3 – Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre a junta Aço – Cu – Aço, @ 100, 200, 500, 1000 e 2000 kHz.	65
Figura 5.4 - Avaliação da amplitude de sinal na junta Al – Cu – Al, com a sonda <i>IONic</i> #14 @ 100, 200 e 500 kHz.....	66
Figura 5.5 - Avaliação da amplitude de sinal na junta Al – Cu – Al, com as sondas <i>IONic</i> #12, #11 e #2 @ 500 kHz.	66

Figura 5.6 - Esquema ilustrativo da inspeção da junta Aço – Cu – Aço e respectivo sinal da sonda #12, #11 e #2 @ 1000 kHz.	67
Figura 5.7 – Esquema ilustrativo da inspeção da junta Al – Aço – Al e respectivo sinal da sonda #12, #11 e #2 @ 1000 kHz.	67
Figura 5.8 - Comparação do sinal da sonda <i>IONic</i> AB4 para as juntas Aço – Cu – Aço, Al – Aço – Al e Al - Cu – Al @ 50 kHz.	68
Figura 5.9 – Comparação do sinal da sonda <i>Pencil Probe</i> com o aumento do diâmetro de furo na chapa 1, linha 6, 7 e 8, furo de 100 e 200 μm @ 25 kHz.....	69
Figura 5.10 - Comparação do sinal da sonda <i>IONic</i> #12 com o aumento do diâmetro de furo na chapa 1, linha 6, 7 e 8, furo de 100 e 200 μm @ 50 kHz.....	69
Figura 5.11 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 500$ kHz.....	70
Figura 5.12 - Resultado experimental da Sonda #2 na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 1000$ kHz.	70
Figura 5.13 – Esquema da variação do sinal da sonda <i>IONic</i> com o <i>offset</i> dos furos.	71
Figura 5.14 - Comparação do sinal da <i>Pencil Probe</i> com o aumento do <i>offset</i> dos furos.....	72
Figura 5.15 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 e 8 @ $f = 50$ kHz.....	73
Figura 5.16 - Resultado experimental da Sonda #13 na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 e 8 @ $f = 100$ kHz.	73
Figura 5.17 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 25, 50$ e 100 kHz.	74
Figura 5.18 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 200, 500, 750$ e 1000 kHz.	75
Figura 5.19 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.	75
Figura 5.20 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.	76
Figura 5.21 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 10, 25, 50, 100$ e 500 kHz.	76
Figura 5.22 – Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 25, 200$ e 500 kHz.	77
Figura 5.23 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 25, 50, 100$ e 500 kHz.	77
Figura 5.24 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 25, 50$ e 100 kHz.	78

Figura 5.25 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 25, 50$ e 100 kHz.....	78
Figura 5.26 – Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.....	79
Figura 5.27 – Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 100, 200$ e 500 kHz.....	79
Figura 5.28 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.....	80
Figura 5.29 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 8, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.....	81
Figura 5.30 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25$ e $50, 100$ e 250 kHz.....	81
Figura 5.31 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 500, 750, 1000, 5000$ e 12000 kHz.....	82
Figura 5.32 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 100, 200$ 500 e 1000 kHz.....	82
Figura 5.33 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	83
Figura 5.34 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	83
Figura 5.35 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100, 200$ e 500 kHz.....	84
Figura 5.36 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 100 kHz.....	84
Figura 5.37 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$, e 100 kHz.....	85
Figura 5.38 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 200$ e 1000 kHz.....	85
Figura 5.39 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #2 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$, e 200 kHz.....	86
Figura 5.40 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50$ e 1000 kHz.....	87
Figura 5.41 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	87
Figura 5.42 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 500 kHz.....	87

Figura 5.43 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100, 200$ e 500 kHz.	88
Figura 5.44 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.	88
Figura 5.45 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	89
Figura 5.46 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	89
Figura 5.47 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 200$ e 1000 kHz.	90
Figura 5.48 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 1000 kHz.	90
Figura 5.49 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz. Com factor de escala de $\times 1.5$, na linha 6.	91
Figura 5.50 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	92
Figura 5.51 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	92
Figura 5.52 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	93
Figura 5.53 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 100 kHz.	93
Figura 5.54 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 100 kHz.	94
Figura 5.55 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	94
Figura 5.56 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100, 500$ e 1000 kHz.	95
Figura 5.57 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	96
Figura 5.58 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	96
Figura 5.59 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	96
Figura 5.60 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.	97

Figura 5.61 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	97
Figura 5.62 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	98
Figura 5.63 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	98
Figura 5.64 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100, 500$ e 1000 kHz.....	99
Figura 5.65 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	100
Figura 5.66 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.....	100
Figura 5.67 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz. Com factor de escala de $\times 1.5$, na linha 6.....	100
Figura 5.68 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	101
Figura 5.69 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	101
Figura 5.70 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.....	102
Figura 5.71 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.....	102
Figura 5.72 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100, 500$ e 1000 kHz.....	103
Figura 5.73 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 200$ e 1000 kHz.....	104
Figura 5.74 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.....	104
Figura 5.75 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 200$ kHz.	104
Figura 5.76 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	105
Figura 5.77 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.....	105
Figura 5.78 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.....	106

Figura 5.79 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.	106
Figura 5.80 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 200$ e 1000 kHz.	107
Figura 5.81 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.	108
Figura 5.82 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.	108
Figura 5.83 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.	108
Figura 5.84 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50$ kHz.	109
Figura 5.85 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.	109
Figura 5.86 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.	110
Figura 5.87 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 3 linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.	110
Figura 5.88 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.	111
Figura 5.89 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.	111
Figura 5.90 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.	112
Figura 5.91 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10, 25$ e 100 kHz.	113
Figura 5.92 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 8, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10$ e 50 kHz.	113
Figura 5.93 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 50$ e 100 kHz.	114
Figura 5.94 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.	114
Figura 5.95 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 200, 500, 1000$ e 1700 kHz.	115
Figura 5.96 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 8 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.	115

Figura 5.97 - Comparação entre o sinal das sondas <i>IONic</i> #13 e #15 (uma e duas <i>layers</i> de bobinas sensíveis, respectivamente).	118
Figura 5.98 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 10, 100$ e 1000 kHz.	119
Figura 5.99 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1, 2, 3 e 4 @ $f = 10$ kHz.	119
Figura 5.100 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 50$ e 100 kHz.	120
Figura 5.101 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 3, 4 e 5 @ $f = 50$ kHz.	120
Figura 5.102 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 50$ e 100 kHz.	121
Figura 5.103 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, 5 e 6 @ $f = 100$ kHz.	121
Figura 5.104 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 50$ e 100 kHz.	122
Figura 5.105 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, 5 e 6 @ $f = 50$ kHz.	122
Figura 5.106 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 1, @ $f = 10$ kHz.	123
Figura 5.107 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 10$ kHz.	124
Figura 5.108 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 6, 7, 8, 9 e 10 @ $f = 10$ kHz.	124
Figura 5.109 - a) Macrografia da chapa da liga AlMgSc sem defeito ($0\ \mu\text{m}$); b) Macrografia da chapa da liga AlMgSc com defeito de $390\ \mu\text{m}$.	125
Figura 5.110 – Resultados da sonda convencional de CI nas duas chapas.	125
Figura 5.111 - Resultados da sonda <i>IONic</i> nas duas chapas.	126

Figura A 1 – Desenho técnico do travão do guia linear.	III
Figura A 2 - Desenho técnico da base de suporte.	V
Figura A 3 - Desenho técnico do garfo.	VII
Figura A 4 - Desenho técnico do bloco para rolamentos.	IX
Figura A 5 - Desenho técnico do copo.	XI
Figura A 6 - Desenho técnico da tampa.	XIII

Figura A 7 - Desenho técnico do apoio da correia.....	XV
Figura A 8 - Desenho técnico do apoio do encoder.	XVII
Figura A 9 - Desenho técnico da base.....	XIX
Figura A 10 - Desenho técnico do fixador da fita (esquerdo).....	XXI
Figura A 11 - Desenho técnico do suporte da ficha de 9 pinos.....	XXIII
Figura A 12 - Desenho técnico da base.....	XXV
Figura A 13 - Desenho técnico do espelho vertical.	XXVII
Figura A 14 - Desenho técnico do suporte do motor.	XXIX
Figura A 15 - Desenho técnico do suporte do barramento vertical.....	XXXI
Figura A 16 - Desenho técnico do suporte do fim de curso.....	XXXIII
Figura A 17 - Desenho técnico do motor vertical.	XXXV
Figura A 18 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 50$ kHz.....	XXXVII
Figura A 19 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 5000$ kHz.....	XXXVII
Figura A 20 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic #2</i> na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 50$ kHz.	XXXVIII
Figura A 21 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic #2</i> na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 200$ kHz.	XXXVIII
Figura A 22 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 @ $f = 750, 2000$ e 5000 kHz.	XXXIX
Figura A 23 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500, 750, 200$ e 5000 kHz.	XXXIX
Figura A 24 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 @ $f = 500, 750, 1000, 2000$ e 5000 kHz.	XXXIX
Figura A 25 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 7 @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.	XL
Figura A 26 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic #2</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500$ e 1000 kHz.	XL
Figura A 27 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic #2</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 @ $f = 1000$ kHz.....	XL
Figura A 28 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic #2</i> sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 @ $f = 50$, e 200 kHz.	XLI
Figura A 29 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic #11</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 @ $f = 100, 200$ e 500 kHz.	XLI
Figura A 30 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic #11</i> sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500$, e 1000 kHz.	XLI

Figura A 31 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLII
Figura A 32 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLII
Figura A 33 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLII
Figura A 34 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLIII
Figura A 35 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 @ $f = 50, 200$ e 1000 kHz.....	XLIII
Figura A 36 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 @ $f = 200, 500$ e 1000 kHz.....	XLIII
Figura A 37 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 @ $f = 500, 1000$ e 2000 kHz.....	XLIV
Figura A 38 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLIV
Figura A 39 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLIV
Figura A 40 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 200$ e 500 kHz.....	XLV
Figura A 41 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #13 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 @ $f = 50$ e 100 kHz.....	XLV
Figura A 42 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #14 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLV
Figura A 43 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.....	XLVI
Figura A 44 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 6 @ $f = 10$ e 25 kHz.	XLVI
Figura A 45 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 7 @ $f = 10$ e 25 kHz.	XLVI
Figura A 46 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 7 @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.	XLVII
Figura A 47 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 8 @ $f = 200, 500, 1000$ e 1700 kHz.	XLVII
Figura A 48 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1, 2 e 3 @ $f = 25$ kHz.....	XLIX

Figura A 49 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1, 2 e 3 @ $f = 50$ kHz.	XLIX
Figura A 50 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1 e 3 @ $f = 100$ kHz.	XLIX
Figura A 51 - Resultado experimental da Sonda <i>Pencil Probe</i> sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1 @ $f = 10, 25, 250$ e 500 kHz.	L
Figura A 52 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #11 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 3, 4 e 5 @ $f = 100$ kHz.	L
Figura A 53 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> #12 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, 5 e 6 @ $f = 50$ kHz.	L
Figura A 54 - Resultado experimental da Sonda <i>IONic</i> com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, e 5 @ $f = 100$ kHz.	LI

INDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características físicas dos materiais base [16].	23
Tabela 3.2 - Composição química das ligas [16].....	23
Tabela 3.3 - Material e número de blocos para juntas bimetálicas.....	24
Tabela 3.4 - Nomenclatura e caracterização dos provetes.....	26
Tabela 3.5 - Comparação entre as alturas de furo prescritas e reais	29
Tabela 3.6 – Profundidade do defeito em rampa.	32
Tabela 3.7 – Características Técnicas	37
Tabela 3.8 – Características do Sistema de Transmissão	37
Tabela 3.9 - Parâmetros de teste utilizados nos ensaios das sondas Pencil Probe.....	38
Tabela 3.10 - Descrição das características operacionais das sondas <i>IONic</i> utilizadas	41
Tabela 3.11 - Características eléctricas e físicas das sondas <i>IONic</i>	42
Tabela 3.12 - Parâmetros de ensaio das sondas <i>IONic</i>	43
Tabela 4.1 – Estratégia de simulação.	52
Tabela 5.1 - Profundidade máxima de furo detectada	116
Tabela 5.2 – Última frequência para a profundidade máxima.....	117
Tabela 5.3 – Última frequência para furo de 100 μm	117

NOMENCLATURA

Nomenclatura Romana

I	Intensidade da corrente eléctrica [A]
\vec{Z}	Vector impedância eléctrica [Ω]
e	Número de Neper ($e = 2.71828$)
f	Frequência [Hz]
$\text{Abs}(\vec{Z})$	Valor absoluto do vector impedância eléctrica [Ω]
$\text{Im}(\vec{Z})$	Parte imaginária do vector impedância eléctrica [Ω]
$\text{Re}(\vec{Z})$	Parte real do vector impedância eléctrica [Ω]

Nomenclatura Grega

\emptyset	Diâmetro [m]
δ	Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]
θ	Ângulo [rad]
ρ	Densidade mássica [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
σ	Condutividade eléctrica [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] ou [% IACS]
μ_r	Permeabilidade relativa

SIGLAS

CI	Correntes induzidas
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
ECA	<i>Eddy Currents Array</i>
END	Ensaaios Não Destrutivos
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FSpW	<i>Friction Stir Spot Welding</i>
GLARE®	<i>GLAss-REinforced Fiber Metal Laminate</i>
HFEC	<i>High Frequency Eddy Currents</i>
IACS	<i>International Annealed Copper</i>
IB	Inspecção de Base
IST	Instituto Superior Técnico
IT	Inspecção de Topo
LOP	<i>Lack of Penetration</i>
LTI	Laboratório de Tecnologia Industrial
MB	Material Base
MEF	Método dos Elementos Finitos
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PEC	<i>Pulsed Eddy Currents</i>
PoD	<i>Probability of Detection</i>
ROC	<i>Relative Operating Characteristic</i>
SFL	Soldadura por Fricção Linear

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estado da Arte e Motivação

A constante evolução tecnológica aumenta cada vez mais a necessidade de desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas sofisticadas de inspeção e controlo de qualidade, especialmente em componentes de elevada responsabilidade. É neste cenário que se encaixam os Ensaios Não Destrutivos (END) nomeadamente a vertente abordada neste trabalho, as Correntes Induzidas (CI).

Em áreas como a nuclear, aeronáutica e aeroespacial, naval e ferroviária e tanto no ramo militar como civil os END tornaram-se uma ferramenta indispensável na detecção de falhas e defeitos. Não só durante o processo de fabrico como na avaliação de componentes em serviço. As CI têm vindo a ganhar o seu espaço na inspeção e caracterização de materiais condutores, não só nos processos de fabrico tradicionais como nos mais recentes como a soldadura no estado sólido.

Os diferentes processos de fabrico utilizados hoje em dia criam variadas necessidades de inspeção. Propriedades como as características físicas do material, monitorização de processos de fabrico ou detecção de defeitos e micro-defeitos necessitam de diferentes métodos de END

para serem avaliados. Neste caso o ramo abordado foram as CI que têm diversas tecnologias de inspecção, nomeadamente: CI pulsadas, CI Matriciais e as sondas *IONic*.

A motivação deste trabalho foi principalmente, dar continuação a trabalhos realizados anteriormente no domínio dos END, por CI no desenvolvimento de um novo conceito de sondas denominadas de *IONic Probe* [1], [2]. Sondas essas que demonstraram excelentes resultados especialmente na detecção de micro-defeitos superficiais e subsuperficiais de difícil detecção, que quando presentes em componentes de elevada responsabilidade, se tornam importantes de detectar e dimensionar, nomeadamente defeitos na raiz do cordão em Soldadura por Fricção Linear (SFL).

A motivação deste trabalho está relacionada com a necessidade de alargar a aplicação da sonda *IONic* a novos materiais e morfologias de defeito, tendo em vista avaliar o seu desempenho relativamente a sondas de CI convencionais através da caracterização de defeitos artificiais e reais em vários materiais de engenharia e componentes estruturais, como materiais processados no estado solido, juntas bimetálicas ou materiais híbridos como o GLARE®.

1.2 Resumo Alargado

1.2.1 Objectivos Tecnológicos e Científicos

O principal objectivo desta dissertação foi simular numericamente e avaliar experimentalmente o desempenho das sondas inovadoras de END por CI, *IONic*. Este objectivo tecnológico visa o desenvolvimento de provetes com morfologias de defeitos distintas e em materiais com diferentes propriedades eléctricas assim como desenvolvimentos ao nível dos meios de locomoção automatizada de sondas. Da conjugação destes desenvolvimentos resultou um sistema integrado de END, cujo propósito foi tornar o sistema mais portátil e independente do tamanho dos provetes a inspeccionar e sobretudo com maior capacidade na detecção de defeitos comparativamente aos métodos convencionais.

Para avaliar as potencialidades das novas configurações da sonda *IONic* impõe-se a necessidade de produção e caracterização metódica dos provetes com defeitos artificiais, para este estudo produziram-se provetes com as seguintes morfologias: defeitos em profundidade, defeitos paralelos à superfície e juntas bimetálicas.

Com o presente trabalho pretende-se também alcançar o objectivo científico de compreender os fenómenos eléctricos e magnéticos envolvidos no funcionamento da sonda *IONic* quando esta está

sobre materiais com diferentes propriedades eléctricas. Quer ao nível de simulação numérica quer ao nível experimental.

A produção de dispositivos de posicionamento e movimentação de sondas, e o desenvolvimento de um suporte universal de sondas *IONic*, são também aspectos bastante importantes abordados neste trabalho, pois a correcta avaliação de sondas e materiais exige meios de locomoção de sondas simples, precisos e versáteis, capazes de se adaptar a diversas condições de inspecção e dimensões de provetes. Um factor a ter em conta é, que os dispositivos desenvolvidos devem estar completamente aptos a ser ligados ao *hardware* de controlo de movimentação dos motores já existente.

1.2.2 Trabalhos Realizados

A fim de cumprir os objectivos delineados para esta dissertação, realizou-se em primeiro lugar uma pesquisa bibliográfica na área dos END por CI, dando especial ênfase a estudos já existentes da sonda *IONic*. É importante destacar os conhecimentos adquiridos na disciplina de Processos Avançados de Fabrico e Ensaio Não Destrutivos, onde foi dada especial importância aos END por CI.

Foram seleccionados e caracterizados os materiais a utilizar na produção de provetes, nomeadamente no que diz respeito às características físicas e eléctricas desses mesmos materiais relevantes para os desenvolvimentos experimentais. De seguida projectaram-se e produziram-se os meios automatizados de locomoção e posicionamento de sondas.

Foram desenvolvidos dois conceitos distintos de dispositivos para movimentação automática da sonda, denominados de Alpha e Delta. Foi também desenvolvido um suporte universal para as sondas *IONic*, com possibilidade de incluir um amplificador de sinal incorporado.

Criaram-se modelos geométricos de simulação no *software*, CST *Studio Suite*, com o objectivo de avaliar os campos magnéticos e as correntes induzidas, de diversas condições sonda / material / defeito, a utilizar como termo de comparação para os resultados experimentais.

Foram produzidas as condições laboratoriais necessárias e foram realizadas as inspecções utilizando os provetes com as duas condições diferentes de defeito, assim como em juntas bimetalicas. Foram também realizados ensaios em chapas de alumínio da liga AlMgSc processadas por SFL. Os dados recolhidos foram posteriormente tratados e apresentados em forma de gráfico, facto que possibilitou uma avaliação simples dos resultados obtidos, permitindo assim retirar resultados contundentes.

1.2.3 Resultados Obtidos e Conclusões

O resultado dos estudos realizados no âmbito desta dissertação mostra que a sonda *IOnic* apresenta maior sensibilidade do que as sondas convencionais na detecção das diferentes morfologias de defeito, em qualquer material assim como na caracterização de juntas bimetálicas.

Nos provetes com defeitos em profundidade, as sondas *IOnic* apresentaram um resultado melhor que as sondas convencionais, esta melhoria de sinal também se verifica nos defeitos paralelos à superfície. Nas juntas bimetálicas, a sonda *IOnic* demonstrou ter a capacidade para indicar correctamente a localização da zona de transição entre materiais de diferentes condutividades e permeabilidades eléctricas.

A simulação numérica através do Método dos Elementos Finitos (MEF) mostrou ser um método eficaz na reprodução das condições de inspecção, tendo sido estas posteriormente utilizadas como termo de comparação, para os resultados dos trabalhos laboratoriais efectuados.

Os meios laboratoriais de deslocamento, posicionamento e fixação de sondas desenvolvidos, apresentaram bons resultados e cumpriram todos os requisitos estabelecidos, no que diz respeito à versatilidade, portabilidade, precisão e rapidez de inspecção.

1.3 Estrutura da Tese

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, ao longo dos quais se fazem referência a todas as matérias tratadas.

No Capítulo 2 apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica e o estado da arte, acerca dos estudos de outros autores na área dos END por CI, mais especificamente da sonda *IOnic*, a fim de se elaborar um resumo do estado actual da arte nesta área, sendo este apresentado de seguida da seguinte forma, END do ponto de vista global, conceito geral de CI e principais desenvolvimentos nos END por CI relevantes para este estudo em particular.

No Capítulo 3 encontram-se descritos os desenvolvimentos experimentais realizados. Em §3.2 apresenta-se a descrição dos materiais em estudo e das diferentes condições de defeito produzidas neste trabalho. Em §3.3 apresenta-se o processo de desenvolvimento dos dispositivos automatizados de locomoção e posicionamento de sondas produzidos, assim como, o suporte universal de sondas *IOnic*, projectado para ser possível a sua utilização em todos os chassis de locomoção disponíveis actualmente. Em §3.4 descreve-se o aparato laboratorial utilizado nas

inspecções, nomeadamente, descrição e caracterização das sondas *IOnic*, dispositivos electrónicos dedicados, *software* utilizado e as características do equipamento comercial usado nas inspecções com das sondas convencionais de CI.

O Capítulo 4 contém a modelação numérica pelo MEF, efectuada no *software* CST *Studio Suite* dos campos magnéticos e correntes induzidas para diversas condições de sonda / material / defeito e encontra-se dividido em quatro pontos principais. Em §4.2 descreve-se os modelos de simulação utilizados, e nas secções §4.3, §4.4 e §4.5 apresentam-se os resultados das simulações nos defeitos em profundidade, nos defeitos paralelos à superfície e nas juntas bimetálicas, respectivamente.

Em §5, apresentam-se os resultados adquiridos experimentalmente para as diferentes configurações de sonda *IOnic* e convencional, recolhidos nos ensaios laboratoriais aos defeitos produzidos e compara-se os resultados dos ensaios das sondas *IOnic* e convencional para os diferentes defeitos.

As conclusões do trabalho realizado e as propostas para possíveis desenvolvimentos e optimizações futuras são apresentadas no Capítulo §6.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica efectuada para a realização da presente dissertação. Com o intuito de aprofundar os conhecimentos na área dos END, nomeadamente os END por Correntes Induzidas, contextualizando assim os estudos realizados no decorrer desta dissertação, de avaliação experimental e caracterização de desempenho de sondas inovadoras de CI.

2.2 Ensaios Não Destrutivos (END)

Os END são processos tecnológicos de avaliação de materiais sem que sejam alteradas de forma permanente as suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. Sendo processos não destrutivos implicam então danos imperceptíveis ou nulos na avaliação de produtos.

Aeronaves, automóveis, comboios, navios, submarinos, e outras, todas estas máquinas não conseguiriam ter um bom desempenho não fosse a qualidade do projecto mecânico, dos materiais envolvidos, dos processos de fabrico, montagem e manutenção. Os END são técnicas utilizadas maioritariamente a componentes ou estruturas acabadas, inacabados ou em período de manutenção mas com o aumento do grau de exigência do controlo de qualidade é também cada vez mais utilizado na avaliação de componentes em serviço [3], [4].

As tecnologias de END foram desenvolvidas com o intuito de proteger a vida daqueles que dependem de alguma forma do bom funcionamento dessas máquinas e todo o meio envolvente, independentemente do ramo da indústria ao qual são aplicados.

Hoje em dia, a globalização industrial fez aumentar o número de produtos, projectados em um país e construídos em outro, com equipamentos e matéria-prima provenientes de todo o mundo. Esta revolução tem como consequência a corrida por menores custos e elevada concorrência, os END podem neste caso ser vantajosos para as empresas que os utilizam, reduzindo custos e aumentando a competitividade.

2.3 Correntes Induzidas (CI)

A primeira pessoa a observar o fenómeno das Correntes Induzidas (CI), ou Eddy Currents (na nomenclatura inglesa) foi o Francês François Arago (1786 - 1853), que em 1825 observou que uma peça de cobre na proximidade da agulha de uma bússola reduzia o efeito do campo magnético da Terra na agulha. Este fenómeno foi mais tarde completamente explicado por Michael Faraday (1791 – 1867).

A descoberta de Faraday foi que, um campo magnético ao passar através de um condutor (material onde os electrões se podem movimentar facilmente) ou quando um condutor passa por um campo magnético, uma corrente eléctrica flui através desse condutor se houver um caminho fechado por onde esta possa circular, a esta descoberta chamou-se de Lei da Indução de Faraday.

Em 1879 David Hughes (1831 – 1900), cientista inglês, deu uma enorme contribuição a esta área ao demonstrar que ao colocar uma bobina em contacto com um material de diferente

condutividade e permeabilidade magnética, as propriedades da bobina alteram-se. Este ponto marca o início da aplicação das CI nos END.

Foi durante a 2ª Grande Guerra que surgiram novos desenvolvimentos na área das CI, quando as CI foram aplicadas à indústria. Os maiores avanços na área das CI ocorreram na década de 50, devido à grande evolução na área da indústria aeronáutica e nuclear.

Actualmente os meios electrónicos que temos ao nosso dispor trouxeram uma enorme evolução aos END por CI, fazendo deste um método imprescindível em diversas áreas da indústria e que é reconhecido pela sua rapidez e simplicidade [3], [5].

2.3.1 Fundamentos do Método END por CI

O ensaio por CI é um dos métodos de END que baseia o seu princípio de funcionamento no fenómeno de indução electromagnética. Na sua forma convencional este fenómeno permite a detecção de defeitos através da observação da variação da impedância eléctrica (\vec{Z}), aos terminais de uma bobina excitada por uma corrente eléctrica alternada (I) e da interacção com um material condutor eléctrico ou magnético [6].

A variante convencional do método faz uso de uma sonda constituída por uma bobina espiral helicoidal cilíndrica que ao impor uma corrente eléctrica alternada aos terminais da bobina, gera segundo a lei de Biot-Savart um campo magnético primário (H_p) ao seu redor (Figura 2.1 (a)), que por sua vez induz, segundo a lei geral de indução, uma corrente eléctrica numa peça condutora colocada na sua vizinhança (Figura 2.1 (b)). A corrente induzida na peça, como qualquer corrente eléctrica, cria um campo magnético secundário H_s que contraria o campo primário H_p e induz uma corrente na bobina que constitui a sonda. A alteração do campo primário H_p é proporcional ao aumento da resistência e a alteração do valor da indutância, representada pela trajectória do *lift-off*, como representada na Figura 2.2 [5].

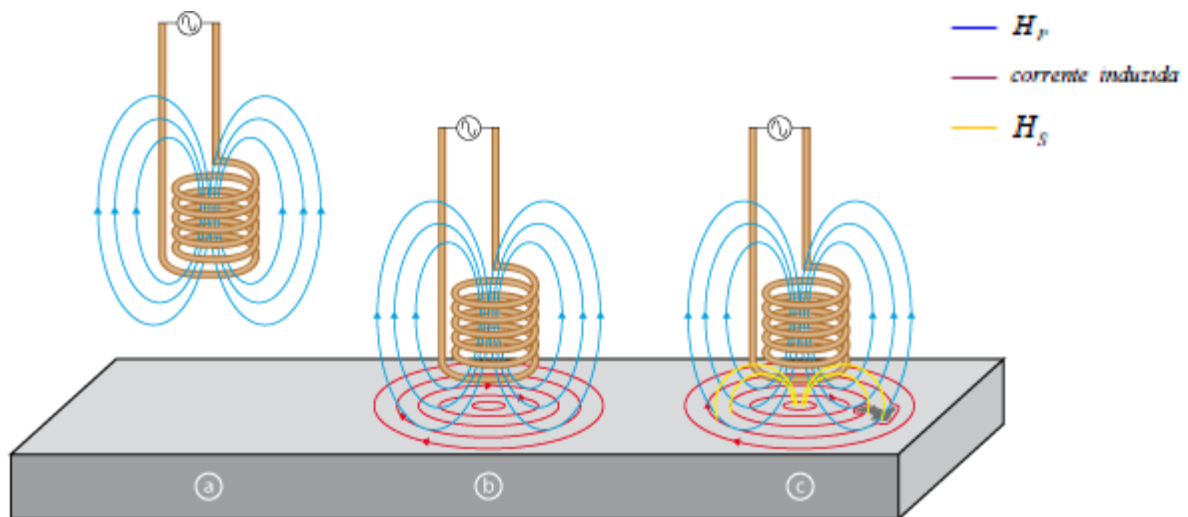


Figura 2.1 - Princípio do método de END por CI [5].

Ao movimentar a sonda sobre material homogêneo (sem defeito) o valor da impedância da bobina mantém-se constante, se existir um defeito na peça como representado na Figura 2.1 (c), a corrente induzida reduz-se, por consequência o campo magnético H_s será menos intenso. Esta redução de H_s pode ser medida com base na variação da impedância eléctrica medida aos terminais da sonda, permitindo assim a detecção de defeitos.

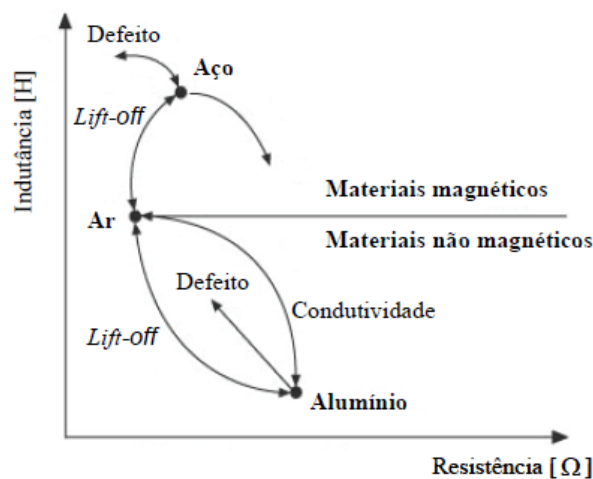


Figura 2.2 - Plano de resposta da impedância das CI [3].

Os END por CI aplicam-se a materiais ferromagnéticos ou não ferromagnéticos, desde que estes sejam condutores eléctricos. As correntes induzidas concentram-se à superfície do material (efeito de pele), reduzindo-se exponencialmente a sua densidade com o aumento da profundidade, de acordo com a equação (2.1), onde I_0 [$A.m^2$] é a densidade de corrente à superfície, f [s^{-1}] é a frequência de excitação, μ [$H.m^{-1}$] é a permeabilidade magnética ($\mu = \mu_0 . \mu_r$) e σ [%IACS] é a

condutividade eléctrica. Esta propriedade das CI limita este método apenas à detecção de defeitos superficiais ou subsuperficiais.

$$I_x = I_0 \cdot e^{-x(\pi f \mu \sigma)^{1/2}} \quad (2.1)$$

Foi convencionada a profundidade máxima de penetração (δ [m]), como sendo a profundidade à qual o valor de densidade do campo é de e^{-1} ($\approx 37\%$) da densidade do campo à superfície do material. (Equação 2.2).

$$\delta_{(f, \mu, \sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} [\text{m}] \quad (2.2)$$

2.3.2 Limitações do Método

A principal limitação deste método, é o facto de os materiais a inspeccionar terem de ser condutores de electricidade e ao facto de as correntes induzidas só existirem à superfície dos materiais a inspeccionar [6].

Também a geometria a inspeccionar, pode trazer dificuldades de inspecção pois uma sonda não acoplada perpendicularmente à superfície do material, mostra uma variação na impedância eléctrica (\vec{Z}) denominada por *lift-off*. Se o defeito for de dimensão ou morfologia de difícil detecção, esta variação da impedância devida ao *lift-off* pode ser superior à variação causada na peça devido à variação da impedância de referente a esse mesmo defeito. Assim, o sinal provocado pelo defeito é absorvido pelo ruído do *lift-off*, o que impossibilita a localização e dimensionamento do defeito. Com a finalidade de evitar os problemas causados pelo *lift-off*, é prática comum no método das CI adoptarem-se parâmetros de funcionamento da sonda que provocam um aumento do ângulo de separação entre a linha de *lift-off* e a linha de condutividade [3].

2.4 Variantes do Método e de Sondas

2.4.1 Sondas Convencionais (axissimétricas e helicoidais)

Sondas helicoidais cilíndricas ou sondas de alta frequência de correntes induzidas (HFEC) utilizam-se normalmente para a detecção de defeitos superficiais. São constituídas por uma bobina que pode ou não estar blindada. Existindo varias configurações de sonda, angulares ou

rectas, como a observada na Figura 2.3 cada uma para fazer face a diferentes geometrias de inspecção.



Figura 2.3 – Exemplo de sonda convencional com configuração em ângulo recto [5].

Estas sondas operam a frequências que variam entre os 5 kHz e os 10 MHz, a gama varia principalmente com as propriedades do material a inspeccionar e morfologias de defeito que se esperam encontrar.

Existem dois tipos de sonda, absolutas e diferenciais, como se observa na Figura 2.4(a) e (b). As sondas absolutas são constituídas por uma única bobina que funciona como elemento de excitação e de recepção, analisando a variação de impedância total da bobina [3], [5].

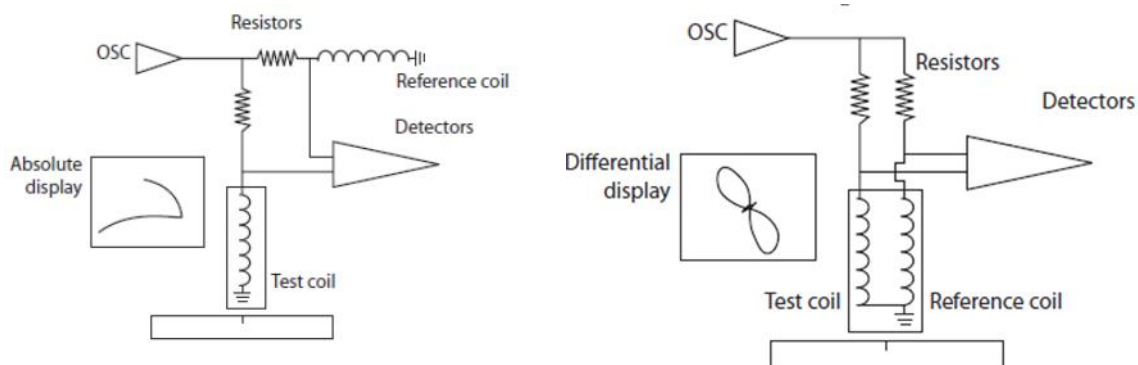


Figura 2.4 - Funcionamento da sonda: (a) Modo absoluto; (b) modo diferencial [3].

No caso de sondas das sondas diferenciais é a diferença de impedâncias que indica a existência de um defeito. Neste caso o modo de emissão-recepção caracteriza-se pela existência de duas bobinas diferentes, uma que induz as CI no material a inspeccionar e outra para detectar alterações na circulação das CI.

As sondas axissimétricas podem ser agrupadas em Micro-bobinas matriciais ou ECA (*eddy currents array*), sendo operadas várias bobinas em simultâneo, que são excitadas sincronizadamente. Esta tecnologia traz algumas vantagens como, uma maior área de inspecção,

elevada resolução, a obtenção de resultados em forma de um gráfico C-Scan¹ e a capacidade de inspeccionar geometrias complexas [5], [7].

2.4.2 Correntes Induzidas Pulsadas

Correntes Induzidas Pulsadas ou *pulsed eddy currents* (PEC), têm sido utilizadas em ensaios não destrutivos principalmente na indústria da energia nuclear e aeroespacial. As PEC apresentam algumas vantagens em relação às correntes induzidas convencionais, nomeadamente, maior profundidade de penetração, maior informação acerca de defeitos, menor sensibilidade a interferências e menores consumos energéticos. Estes factores tornam este método cada vez mais um ponto de referência na área dos END.

Em comparação com o método convencional de inspecção por correntes induzidas, as correntes pulsadas são excitadas por uma onda quadrada, que permite com um único passo a obtenção de mais informação, uma vez que utiliza uma excitação com multifrequências o que leva a uma penetração cerca de 10% maior que a conseguida através dos métodos convencionais [8].

Uma das limitações deste método prende-se com a dificuldade de detecção de alguns defeitos encontrados nas peças, defeitos perpendiculares às CI detectam-se facilmente, enquanto defeitos paralelos ou de grande comprimento não são de fácil detecção. Para colmatar esta falha, foi desenvolvido um método que consiste numa sonda com uma corrente induzida uniforme, e emite duas ondas sinusoidais de excitação que geram um campo magnético rotativo, no entanto esta não teve os resultados desejados na detecção de defeitos em todas as direcções [11].

2.4.3 Sonda “*IONic Probe*”

A Sonda *IONic*² é um novo conceito de sonda de CI para ensaios não destrutivos que foi patenteada a 19 de Outubro de 2007, por Telmo Santos e Pedro Vilaça [1].

A criação desta sonda, que é constituída por um filamento de excitação e duas bobinas sensíveis, teve como principal objectivo colmatar algumas limitações dos métodos anteriores, aumentando a capacidade detecção de defeitos com dimensões ou morfologias de difícil detecção mediante:

- i) atenuação do efeito de *lift-off*, ii) aumento da sensibilidade através da proximidade com a

¹ C-Scan é a representação 2D da amplitude do sinal recebido em relação ao tempo apresentado em uma escala de cores ou tons de cinzento.

² Este nome surge da sua geometria a fazer lembrar a forma geométrica dos adornos característicos dos capitéis das colunas da ordem jónica (*IONic* em inglês) que surgiu na antiga Grécia oriental por volta do século 450 a. C. Estes adornos caracterizavam-se por uma forma simétrica em espiras, tipo voluta.

superfície do material a inspeccionar e iii) CI que circulam em todas as direcções do material (Figura 2.5).

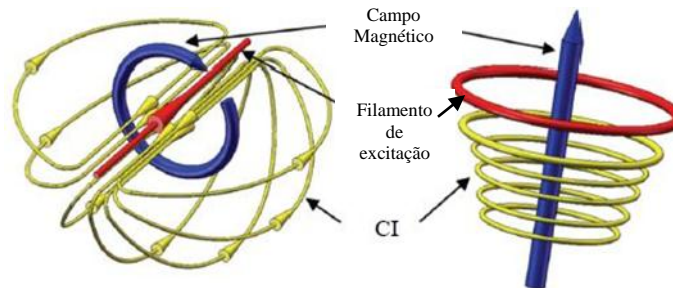


Figura 2.5 - Representação esquemática das correntes e campos nas sondas *Ionic* e convencionais [3].

O filamento de excitação é excitado com uma corrente eléctrica alternada de onda sinusoidal, podendo também ser utilizadas ondas triangulares ou quadradas. Frequências de funcionamento estão entre os 5 kHz e os 2 MHz.

O aspecto que diferencia a sonda *Ionic* das sondas convencionais é o facto de esta só ser sensível aos campos de correntes induzidas que resultem de heterogeneidades e não aos campos de CI criados em materiais livres de quaisquer defeitos, obtendo-se um sinal constante aos terminais da sonda, independentemente da condutividade global do material e da posição da sonda relativamente a esse material (*lift-off*). Ao nível eléctrico isto corresponde a eliminar o efeito de indução da bobina sensível, pois o efeito de auto-indução depende do campo das correntes induzidas, que depende por sua vez da condutividade eléctrica e da permeabilidade magnética dos materiais, bem como da frequência do fluxo de campo magnético que atravessa as suas espiras.

A bobina sensível espiral plana é simétrica relativamente ao seu eixo central e caracteriza-se pela forma em D (uma semicircunferência), com enrolamentos em sentidos opostos, que gera um efeito de compensação da CI entre as duas bobinas. Na presença de um meio homogéneo, a corrente induzida pelo filamento de excitação em uma das bobinas sensíveis, tem a mesma intensidade e o sentido oposto da corrente induzida na outra bobina, daí resulta uma diferença de potencial nula aos terminais das bobinas ($U_{out} = 0$) como representado na Figura 2.6 a) e Figura 2.6 b), no caso da sonda no ar ou sobre um material homogéneo, respectivamente, este equilíbrio de correntes mantém-se independentemente da distância da sonda ao material a inspeccionar (*lift-off*). Quando a sonda atravessa uma descontinuidade Figura 2.6 c), existe uma variação da tensão eléctrica induzida (U_{out}) aos terminais das bobinas sensíveis [1].

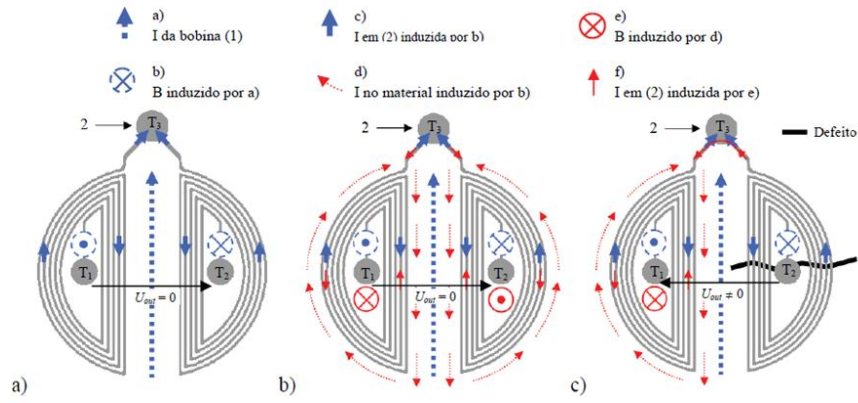


Figura 2.6 – Princípio de funcionamento da sonda *IONIC*: a) Sonda no ar, b) Sonda sobre material homogêneo, c) Sonda sobre defeito [1].

A tensão eléctrica induzida U_{out} nos terminais das bobinas sensíveis caracteriza-se por uma diferença de fase (Θ) e amplitude (A) relativamente à corrente eléctrica que circula através do filamento de excitação. A avaliação dos defeitos é feita com base na variação das componentes real e imaginária do vector impedância eléctrica (Equação (2.3)) [11].

$$Real = Re \left\{ \frac{\vec{U}_{out}}{\vec{I}} \right\} [\Omega] \quad Imaginária = Im \left\{ \frac{\vec{U}_{out}}{\vec{I}} \right\} [\Omega] \quad (2.3)$$

Outros aspectos relevantes de funcionamento que transcorrem da concepção da sonda *IONIC* [3] são:

- i) Carácter tridimensional de circulação das CI no material a inspeccionar, as CI circulam em todos os planos com rotação segundo o eixo definido pelo filamento de excitação, permitindo assim uma melhor detecção de defeitos comparativamente às sondas convencionais, independentemente da sua morfologia, como se pode observar na Figura 2.7.

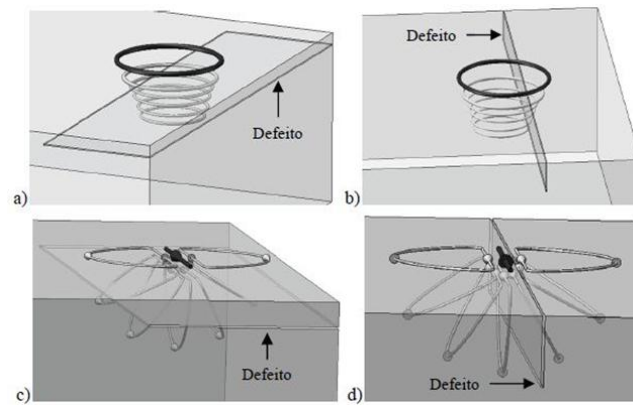


Figura 2.7 – Circulação das CI em defeitos superficiais: a) Sonda axissimétrica junto de defeito paralelo, b) Sonda axissimétrica junto de defeito perpendicular, c) Sonda *IONic* junto de defeito paralelo e d) Sonda *IONic* junto de defeito perpendicular [3].

- ii) Paralelismo entre as bobinas sensíveis e a sua proximidade ao material a inspeccionar, estes dois factores oferecem uma maior sensibilidade a sonda na detecção de defeitos com morfologias variadas e dimensões reduzidas. O facto de a sonda funcionar em modo diferencial também contribui para aumentar a sua sensibilidade, já que o valor de tensão induzida U_{out} é menos susceptível a interferências.
- iii) A direcção rectilínea das correntes induzidas pelo filamento de excitação no material, este facto pode ser usado como vantagem nas inspecções em que existe um conhecimento *a priori* das orientações preferenciais dos defeitos.
- iv) Redução do efeito de bordo, se o filamento de excitação se encontrar perpendicular ao bordo do material, a tensão eléctrica U_{out} medida nas bobinas sensíveis não é alterada pela ausência parcial de material.
- v) Possibilidade da sonda operar segundo um método de inspecção baseado na análise da variação da tensão eléctrica induzida aos terminais das bobinas U_{out} durante um movimento de rotação de 360° da sonda sobre si mesma (Figura 2.8), em cada ponto da inspecção. Este procedimento permite aumentar a informação relativa a cada ponto do material, uma vez que cada passagem fornece não apenas um valor único do sinal, mas sim um conjunto de valores associados a cada posição angular da sonda.

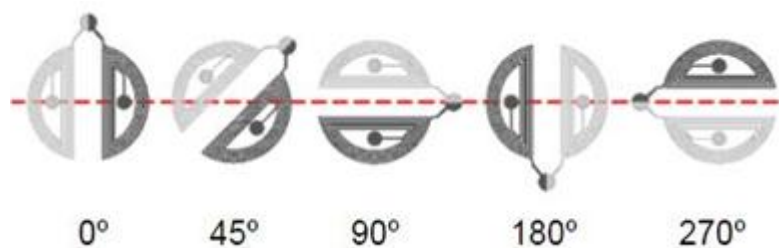


Figura 2.8 - Representação esquemática do método de inspecção com movimento de rotação da sonda a 360° [1].

A capacidade da sonda *IONic* na detecção de defeitos na raiz de cordões de SFL foi demonstrada em [9]. Neste estudo foram avaliadas três chapas de SFL, com diferentes tipos de defeito sendo os resultados da sonda *IONic* comparados com os obtidos com sondas convencionais de CI. É importante referir que o processo de SFL causa por si só variações no valor da condutividade eléctrica mesmo sem existência de defeitos.

Os resultados deste estudo demonstram claramente a localização dos defeitos e a variação da amplitude do sinal devido a cada um dos defeitos. Os resultados das inspecções efectuadas com as sondas convencionais não revelaram qualquer sinal da presença de defeitos.

Um estudo [10] publicado no ano 2011 por T.G. Santos, *et al*, revela as capacidades do equipamento *IONic* na avaliação de soldaduras de chapas sobrepostas em AA2024 - T351 por *Friction Stir Spot Welding* (FSpW) com e sem revestimento Aclad™ e na detecção de defeitos artificiais no material compósito GLARE®. Este estudo foi realizado utilizando dois tipos de sonda diferentes, uma sonda *IONic* e uma sonda planar absoluta.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados com a sonda *IONic* revelam a capacidade de detectar defeitos nos provetes sem o revestimento Aclad™, a sonda planar absoluta não se mostrou capaz de identificar qualquer tipo de defeito. Demonstrou-se assim, para este caso, um desempenho superior da sonda *IONic* relativamente à sonda planar convencional.

No mesmo estudo [10], foi avaliado o desempenho da sonda *IONic*, na inspecção de GLARE® (laminado de alumínio e fibra de vidro, composto por diversas camadas), onde foram realizados três furos de 1 mm de diâmetro em uma chapa com 6 camadas de alumínio. Foram executados varrimentos, com o filamento de excitação da sonda *IONic* posicionado paralelamente ao alinhamento dos furos.

Observando os resultados relativos à sonda *IONic*, percebe-se que esta detectou com facilidade os defeitos às diferentes profundidades. Os resultados referentes aos varrimentos realizados com a sonda espiral plana, não revelaram a mesma eficácia na detecção dos defeitos.

No estudo recentemente realizado, que teve como objectivo otimizar alguns parâmetros geométricos da sonda *IONic*, tendo em vista aumentar a eficácia na detecção de defeitos [11]. Conclui-se que dos parâmetros geométricos considerados os que revelaram maior influência no desempenho da sonda *IONic* foram:

- i) A espessura e espaçamento das espiras sensíveis: ficou demonstrado que, o aumento da superfície das bobinas sensíveis aumenta o fluxo de campo magnético por elas atravessado, o que se traduz numa maior intensidade do sinal recebido.
- ii) A altura do filamento de excitação em Z: a proximidade do filamento de excitação à superfície a inspeccionar, aumenta a intensidade das CI no material, sem no entanto o filamento de excitação ser colocado no mesmo plano das bobinas sensíveis, permitindo que estas se mantenham lado a lado.
- iii) O comprimento do filamento de excitação: ficou demonstrado que um filamento de excitação de comprimento igual a metade do diâmetro das bobinas sensíveis produz resultados ligeiramente piores do que uma sonda com o filamento de excitação com comprimento igual ao diâmetro das bobinas sensíveis e que um comprimento do filamento de excitação duas vezes superior ao diâmetro das bobinas sensíveis produz um sinal de com metade da intensidade, mas com aproximadamente o dobro da resolução espacial.

Deste estudo resultaram as novas configurações com geometrias optimizadas da sonda *IONic*. No entanto, até ao momento a sua aplicação tem estado restrita a defeitos padrão em alumínio e à avaliação de SFL, nunca tendo sido estas novas geometrias avaliadas em diferentes condições de defeitos e materiais.

2.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo sintetizou-se a pesquisa bibliográfica efectuada no âmbito desta dissertação, começou-se com um enquadramento histórico e a explicação sobre o que são os END e para que são utilizados. De seguida apresentou-se uma síntese sobre o que são CI e os princípios físicos nos quais este fenómeno se baseia, para uma melhor compreensão dos fenómenos estudados neste trabalho.

Especificaram-se os fundamentos e limitações existentes no método de END por CI, e foram apresentadas as diferentes variantes do método e comparação das capacidades e limitações dessas mesmas variantes.

Foi dada especial relevância às características da sonda *IONic*, técnica de END por CI e apresentados alguns casos de estudo anteriormente realizados, realçando as potencialidades da sonda *IONic* que serviram como motivação para os estudos e avaliações nesta dissertação.

3 DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

O trabalho descrito neste capítulo teve como objectivo criar os recursos laboratoriais necessários para a avaliação da capacidade de penetração das CI criadas pelas sondas *IOnic* e a sua capacidade de detectar defeitos em profundidade e paralelos à superfície de inspecção assim como o comportamento das sondas em juntas bimetálicas, utilizando os recursos existentes nos laboratórios e oficinas do Laboratório de Tecnologia Industrial (LTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI).

É apresentada uma vista global dos materiais utilizados e condições de defeitos, assim como a exposição detalhada acerca da caracterização e aspectos relevantes de fabrico dos provetes.

Para um melhor entendimento das características das sondas descreve-se pormenorizadamente os parâmetros de ensaio aplicados às sondas *Pencil Probe* e *IOnic* utilizadas. As sondas absolutas comerciais disponíveis no mercado *Pencil Probe* foram utilizadas a fim de obter um perfil de condutividade dos materiais testados e assim posteriormente comparar com os resultados obtidos com as sondas *IOnic*.

A criação de condições laboratoriais e concepção de meios de locomoção é a par com a avaliação do desempenho das sondas *IONic*, um ponto importante desta dissertação, pois sem sistemas de locomoção apropriados com elevada exactidão, da avaliação das sondas não surtiria resultados plausíveis. Desenvolveram-se assim, dois novos chassis de movimentação e um novo suporte de sondas, para preencherem diferentes exigências de inspecção.

3.2 Descrição das Condições de Defeito

Um ponto importante deste projecto foi o desenvolvimento e produção de provetes com defeitos padrão em materiais nunca inspeccionados com a sonda *IONic*. Neste subcapítulo estão descritas as características mais relevantes dos materiais utilizados (§3.2.1), assim como os dois tipos de defeitos estudados e juntas bimetálicas (§3.2.2).

3.2.1 Caracterização e Descrição de Materiais Base

Os provetes com os defeitos artificiais foram realizados em chapas de 10 mm de espessura provenientes de barras de material laminado, os defeitos em GLARE®, produzidos a partir de chapas com seis lâminas de alumínio.

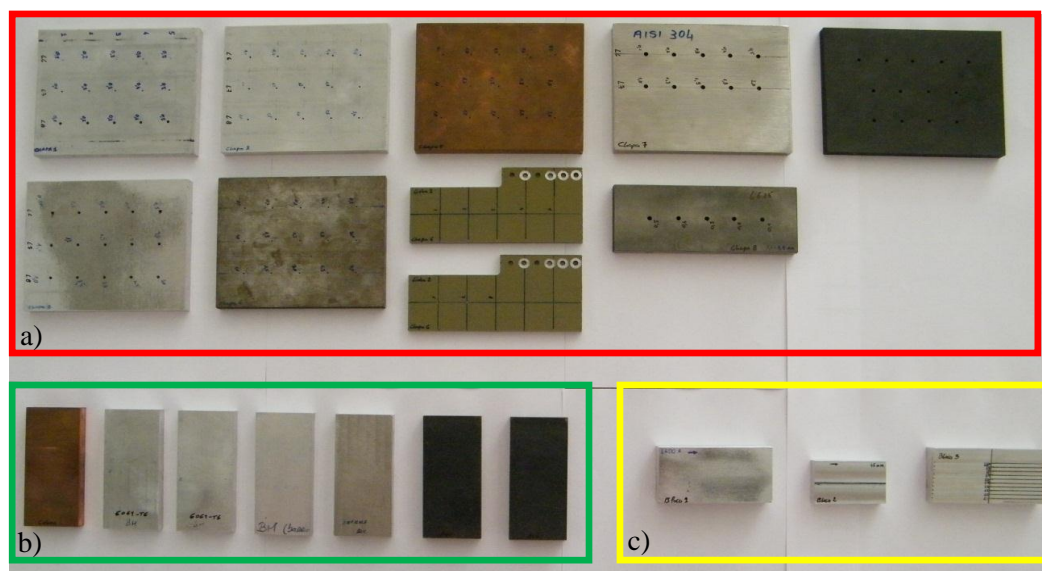


Figura 3.1 - Imagem dos provetes realizados: a) chapas com matrizes de furos a vermelho; b) blocos para juntas bimetálicas, a verde; e c) blocos com defeitos paralelos, a amarelo.

As características físicas e a composição química das ligas estão indicadas Tabela 3.1 e Tabela 3.2 respectivamente. O objectivo da escolha destes materiais foi avaliar o comportamento

da sonda IONic e da sonda convencional, num leque de materiais com valores de condutividade eléctrica (σ) e permeabilidade magnética (μ) muito diferentes de modo a abranger o maior número possível de materiais usados na indústria, foram escolhidos para os testes nove materiais divididos em três grupos principais, metais ferrosos e não ferrosos e não metais ou híbridos.

Tabela 3.1 - Características físicas dos materiais base [16].

	Material	Condutividade Eléctrica		Resistividade ($\Omega.m$)	Permeabilidade μ (H/m)	Densidade (Kg/m ³)
		(%IACS)	(S/m) 10 ⁶			
Metais	Não Ferrosos	Al 5083-H12	29	16.8	5,95E-08	2660
		Al 6061-T6	43	24.9	4,00E-08	2700
		Al 1100	57 - 61,8	33.1 – 35.8	2,90E-08	2710
		Cobre electrolítico	100	58	1,71E-08	8940
	Ferrosos	Ferro Fundido (GG25)	15,6	9,05	1,11E-07	7870
		Aço (AISI 1012/15)	10,84	6,29	1,59E-07	7870
		Inox (AISI 304)	2,33	1,35	7,40E-07	8000
Não Metais	GLARE®		-	-	-	-
	Grafite (IC5)		0,22	0.128	7,84E-06	1750

Tabela 3.2 - Composição química das ligas [16].

Material		Componentes de Liga (%)											
		Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	C	Ni	
Metais	Não Ferrosos	Al 5083-H12	92,4 - 95,6	0,05 - 0,25	≤ 0,10	≤ 0,4	4 - 4,9	0,4 - 1	≤ 0,4	≤ 0,15	≤ 0,25	-	-
		Al 6061-T6	95,8 - 98,6	0,04 - 0,35	0,15-0,4	≤ 0,70	0,8-1,20	≤ 0,15	0,4-0,8	≤ 0,15	≤ 0,25	-	-
		Al 1100	≥ 99	-	0,05-0,2	≤0,95	-	-	-	-	-	-	-
		Cobre Electrolítico	-	-	≥ 99,9	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ferrosos	Ferro Fundido (GG25)	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-
		Aço (AISI 1012/15)	-	-	-	99,13-99,57	-	0,3-0,6	-	-	-	0,13-1,18	-
		Inox (AISI 304)	-	18-20	-	66-74	-	≤2	≤ 1	-	-	≤ 0,08	8-10,5
		Não Metais	GLARE®	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Grafite (IC5)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-

3.2.2 Descrição de Defeitos e Condições de Inspeção

3.2.2.1 Juntas Bimetálicas

Para uma melhor compreensão do comportamento das sondas ao atravessar diferentes materiais, foram produzidos para facilitar este tipo de ensaio 7 provetes com 90 x 45 x 10 mm de dimensão em 5 materiais diferentes como se observa na Tabela 3.3, permitindo desta forma a avaliação de 8 combinações diferentes de materiais.

Tabela 3.3 - Material e número de blocos para juntas bimetálicas.

Proвете	Quantidade
Al 6061 –T6	2
Al 1100	1
Al 5083 – H12	1
AISI 1012/15	2
Cobre	1

A Figura 3.2 ilustra uma das juntas bimetálicas a ser inspeccionada, usando um dos protótipos desenvolvidos de locomoção e uma sonda comercial da marca Olympus. Na Figura 3.3 apresentam-se os provetes produzidos em cobre, aço e alumínio.

Os conjuntos de blocos foram posicionados lado-a-lado num suporte desenvolvido para o efeito, composto por 2 perfis de cantoneira e 2 parafusos com porca (como pode ser observado na Figura 3.3). Efectuaram-se varrimentos de 80 mm de comprimento, que tiveram início a metade da largura do primeiro bloco, atravessaram na totalidade o bloco central e terminaram no terceiro bloco. Os blocos utilizados no início e final das juntas foram sempre do mesmo material. Para evitar que as sondas prendessem nas arestas dos blocos ao atravessá-los utilizou-se em todos os varrimentos realizados com a sonda *IONic* um *lift-off* de 200 µm entre a sonda e as chapas.

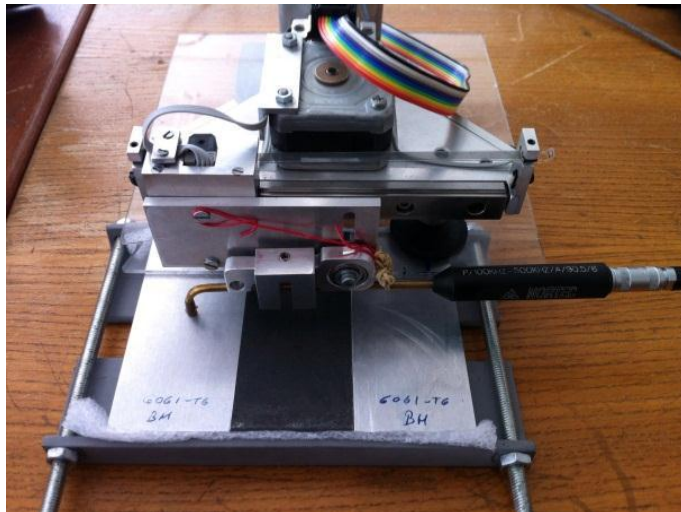


Figura 3.2 - Junta bimetálica Al – Aço – Al, no acto de inspecção.

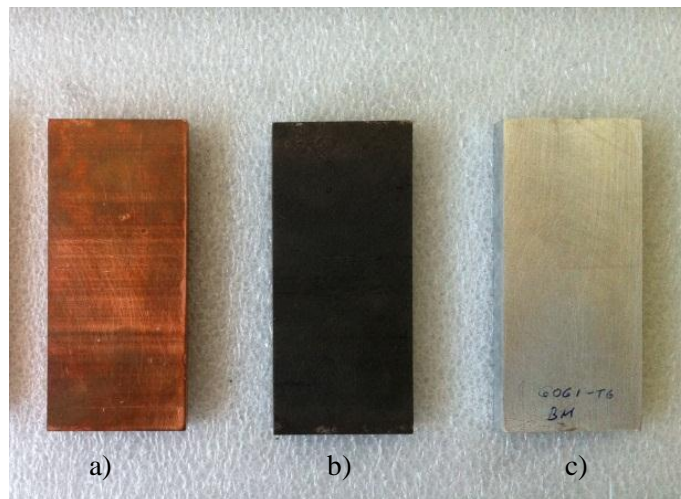


Figura 3.3 – Provetes para juntas bimetálicas: a) provete em cobre; b) provete em aço; c) provete em alumínio.

3.2.2.2 Defeitos em Profundidade

Os provetes de furos cilíndricos foram realizados em 9 chapas de diferentes materiais, como se pode observar na Tabela 3.4, observa-se também nessa tabela o diâmetro de furo e a condutividade eléctrica (σ) dos materiais.

A medição da condutividade eléctrica dos materiais foi efectuada com uma sonda de condutividades, Olympus 60 kHz Conductivity S/N T10774 e o equipamento de CI Nortec 500, com o objectivo de serem posteriormente relacionados os resultados obtidos nos trabalhos laboratoriais e respectivas condutividades eléctricas dos materiais.

Tabela 3.4 - Nomenclatura e caracterização dos provetes

	Material	Diâmetro dos Furos \varnothing [mm]	Condutividade σ [%IACS]
Chapa 1	Al 1100	0.5, 1, 2	52.75
Chapa 2	Al 5083 – H12	2	28.57
Chapa 3	Al 6061 –T6	1	44.7
Chapa 4	AISI 1012/15	1	19.53
Chapa 5	Cobre	1	103.96
Chapa 6	GLARE®	1	24.62
Chapa 7	AISI 304	3	2.1
Chapa 8	GG 25	3	8.14
Chapa 9	IC5	1	0.22

Esta morfologia de defeito foi criada para avaliar dois aspectos diferentes. Primeiro perceber a diferença do sinal da sonda, quando esta atravessa furos de diferente diâmetro e perceber até que profundidade consegue ser detectado o furo, foram assim levadas a cabo inspeção na superfície oposta à utilizada para a abertura dos furos (Inspeção de Base ou IB). Uma segunda avaliação prende-se com, passar a sonda sobre a face perfurada e perceber a capacidade da sonda em detectar diferenças nas profundidades dos furos (Inspeção de Topo ou IT).

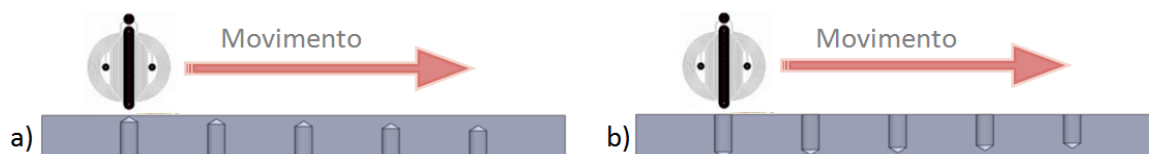


Figura 3.4 - Representação esquemática das duas condições de inspeção realizadas:
a) Inspeção de Base; b) Inspeção de Topo.

Na produção destes provetes foram maquinados um total de 9 provetes, com o auxílio de uma fresadora convencional de 3 eixos de accionamento mecânico, que devido a folgas existentes no equipamento proporciona baixa tolerância dimensional, pois para a mesma posição do nónio podem corresponder diferentes posições da ferramenta.

Na execução de furos, utilizou-se o engenho de furar pertencente ao LTI, cuja precisão é da ordem do milímetro dificultando a sua realização, uma vez que se pretendiam furos cuja profundidade varia na ordem dos 100 μm .

Para proceder à execução dos furos descritos, limitou-se o curso do engenho, e para garantir que os furos ficaram a variar de 100 em 100 μm de profundidade, utilizaram-se folhas com 100 μm de espessura empilhadas, sendo estas sucessivamente retiradas, por forma a rebaixar o provete em relação ao curso máximo do engenho de furar.

Cada chapa é caracterizada por 8 linhas de furos, representadas nos provetes por L (de linha) seguido pelo número correspondente, L1 por exemplo. A Figura 3.5 a) apresenta de forma esquemática a nomenclatura utilizada para identificar as linhas de ensaio nos provetes, em Figura 3.4 b) um dos provetes produzidos e em Figura 3.4 c) uma representação esquemática em corte dos furos na linha 8 da chapa 1, que permite perceber o posicionamento e a diferença nas profundidades de furo.

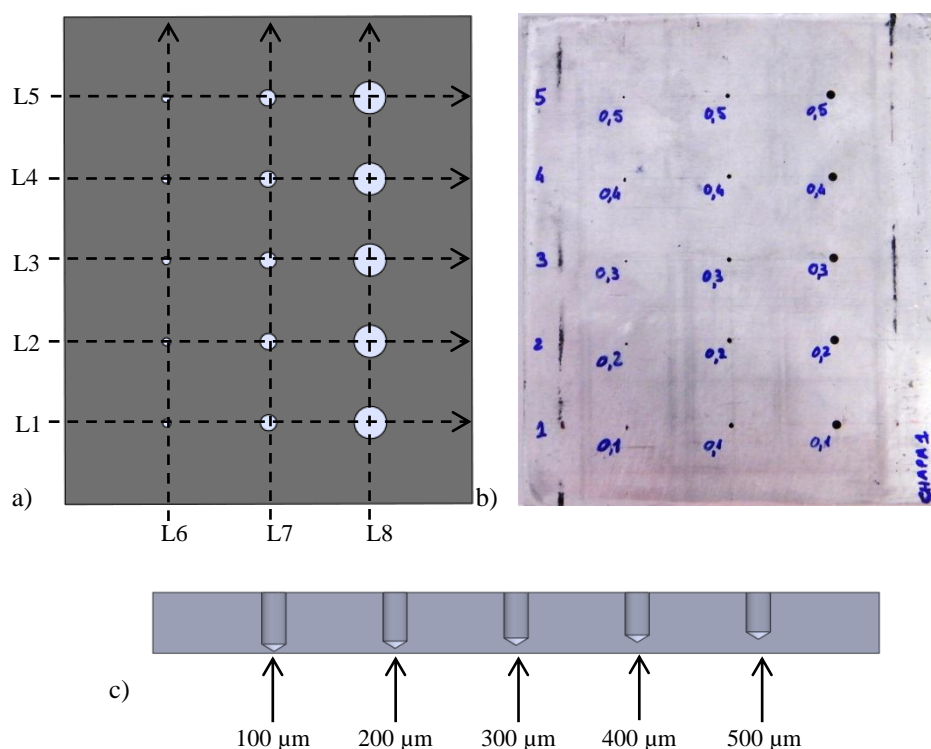


Figura 3.5 - Esquema da Chapa 1: a) numeração das linhas e respectiva direcção de inspecção; b) imagem da chapa 1; e c) vista em corte da linha 6 (L6).

Para avaliar o comportamento das sondas em diferentes materiais, criaram-se as chapas numeradas de 2 a 9 e uma nova matriz de furos, na qual os furos não são passantes e têm todos o mesmo diâmetro, Figura 3.6 a) e alturas de material que variam entre os 100 e os 3000 μm (ou de 0.1 a 3,0 mm, como representado na Figura 3.6 b)).

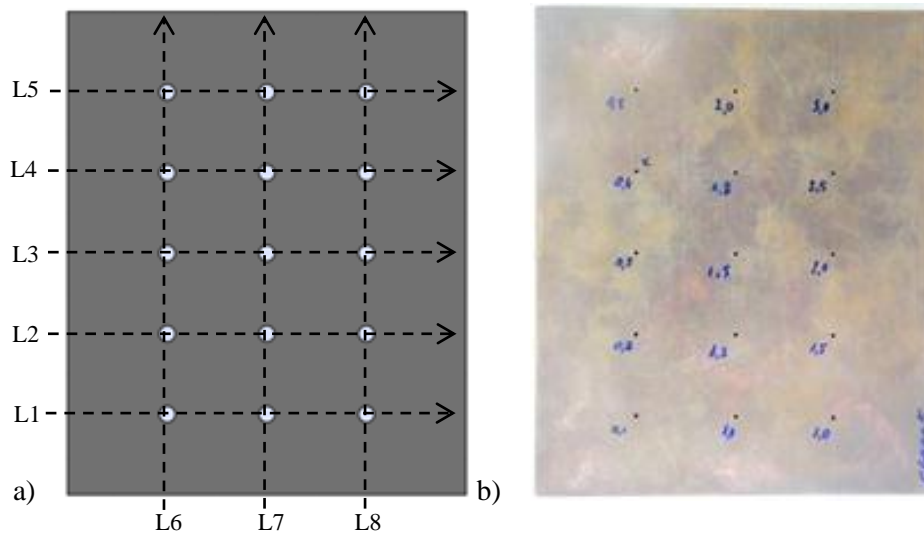


Figura 3.6 – Esquema da chapa 6 (aplicado também a todos os provetes onde não existe variação de diâmetro): a) numeração das linhas e respectiva direcção de inspecção; e b) imagem da chapa 5.

Na Figura 3.7 a) apresenta-se o processo de medição da profundidade dos furos, caracterizado pela introdução de um fio de cobre de $\varnothing=1.6$ mm no furo que foi de seguida marcado, retirado e medido. Pode observar-se na Figura 3.7 b) uma imagem macrográfica de um furo genérico realizado em AA1100 do mesmo modo que os realizados nos provetes, em corte transversal, onde se pode observar a morfologia do furo. Como é natural o furo apresenta uma forma cilíndrica (A) correspondente à superfície lateral da broca e uma calote esférica no fim relativa à extremidade da mesma (B), com aproximadamente 300 μ m de profundidade.

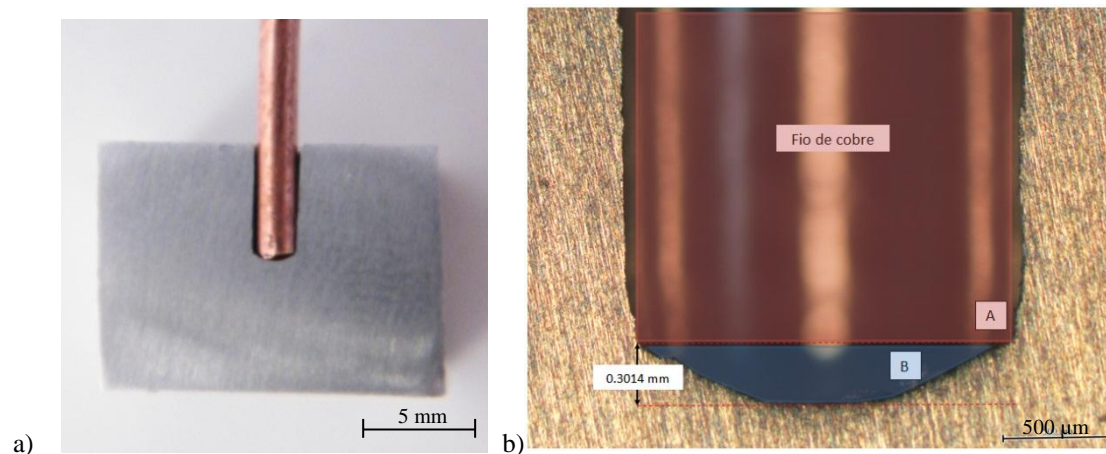


Figura 3.7 – Vista em corte exemplificativa dos furos realizados nos provetes para avaliação de defeitos em profundidade: a) macrografia e demonstração do processo de medição; b) micrografia do furo e esquema da profundidade média alcançada pelo fio durante a medição.

Devido às dificuldades na realização de furos com a precisão pretendida, as alturas de material prescritas não foram por vezes atingidas, originando erros por excesso e por defeito, a Tabela 3.5 mostra as variações entre os valores prescritos e reais para a chapa 2. Devido ao facto de todos os provetes terem sido todos produzidos pelo mesmo método, admitiu-se que os resultados para as restantes chapas contêm o mesmo erro.

Tabela 3.5 - Comparação entre as alturas de furo prescritas e reais

Altura Prescrita [μm]	Altura Real [μm]
100	150
200	200
300	250
400	350
500	450
1000	1000
1300	1200
1500	1500
1800	1700
2000	2000
2500	2600
3000	3000

3.2.2.3 Defeitos Paralelos à Superfície

De modo a avaliar a capacidade das sondas *IONic* na detecção de defeitos paralelos à superfície, foram produzidos 3 blocos em Al 5083 – H12 (Figura 3.8) com defeitos paralelos criados por electroerosão, com diferentes características.

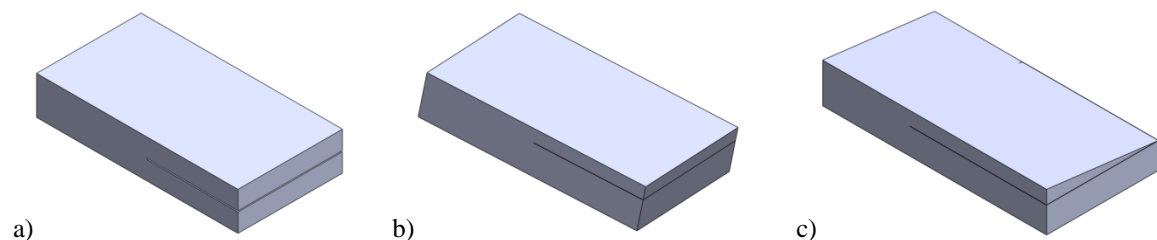


Figura 3.8 - Blocos com defeitos paralelos; a) Bloco1; b) Bloco2; c) Bloco3.

O Bloco1 (Figura 3.9) foi produzido com as dimensões 79x41x15 mm com um defeito paralelo à superfície de 400 μ m de espessura criado por electroerosão a 7.5 mm da superfície, de seguida inspeccionado através de varrimentos de 40 mm em ambas as faces e os resultados registados.

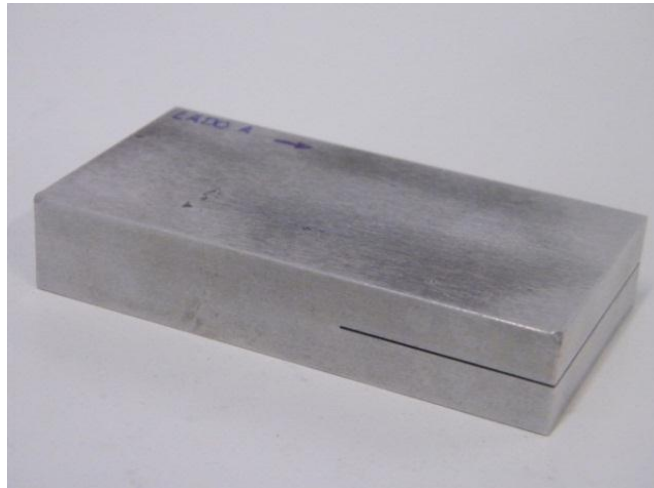


Figura 3.9 – Bloco 1 visto em perspectiva.

O Bloco2 representado na Figura 3.10, após ser maquinado com as dimensões 51x31x10 mm, foi nele criado um defeito paralelo por electroerosão a 3 mm da face superior do bloco e de seguida levado a uma prensa hidráulica e esmagado com uma força de 800 kN.

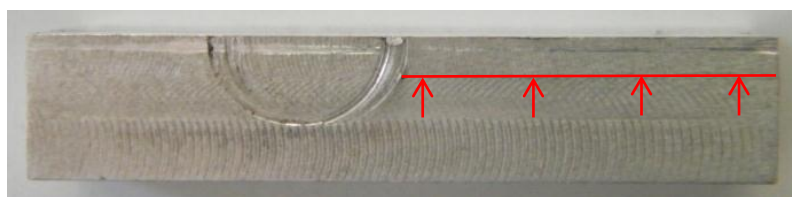


Figura 3.10 – Bloco 2 com a indicação da linha de defeito.

O Bloco3 (Figura 3.11), com um volume de material de 82x41x14.5 mm e um corte por electroerosão com 400 μ m de espessura a 9.5 mm da face inferior. O bordo do bloco foi esmagado com o auxílio de uma prensa hidráulica que exerceu 800 kN de força, como resultado desse esmagamento o defeito ficou com ambas as faces perfeitamente encostadas no bordo (≈ 0 μ m) e gradualmente mais afastadas até atingirem no centro do bloco aproximadamente a

medida com que o corte havia sido realizado ($400\text{ }\mu\text{m}$). O bloco foi posteriormente maquinado em rampa.

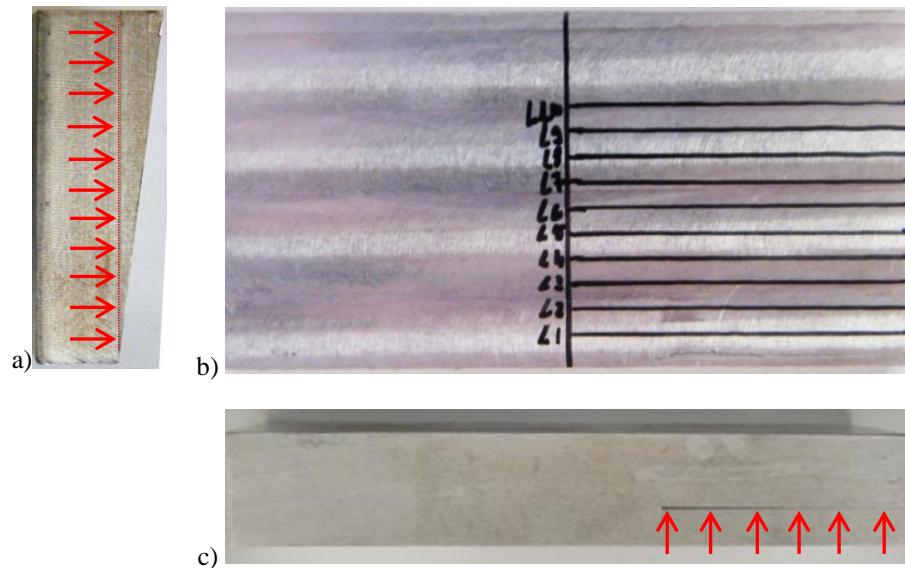


Figura 3.11 – Bloco 3: a) vista lateral com a indicação da linha de defeito; b) superfície do bloco e linhas de inspeção; e c) vista de trás do bloco onde se observa o afastamento gradual do defeito.

Apresenta-se na Figura 3.11 a) a vista lateral do bloco com a representação (a vermelho) da linha de defeito, na Figura 3.11 b) a superfície e respectivas linhas de inspeção, numeradas de L1 a L10 com distâncias entre o defeito e a superfície do bloco a variar entre os $400\text{ }\mu\text{m}$ (em L1) e os $4000\text{ }\mu\text{m}$ (em L10) e na Figura 3.11 c) a vista posterior do bloco, onde é possível observar o afastamento gradual do defeito.

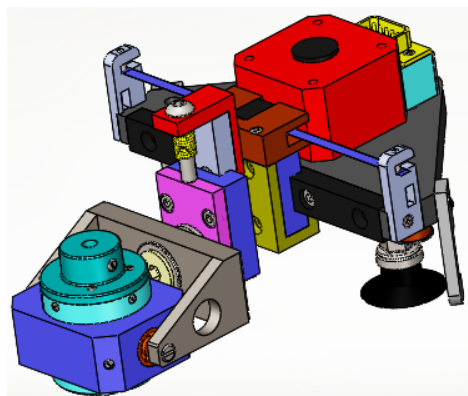
Observa-se na Tabela 3.6 a distância entre o defeito e a superfície de inspecção, nas diversas linhas.

Tabela 3.6 – Profundidade do defeito em rampa.

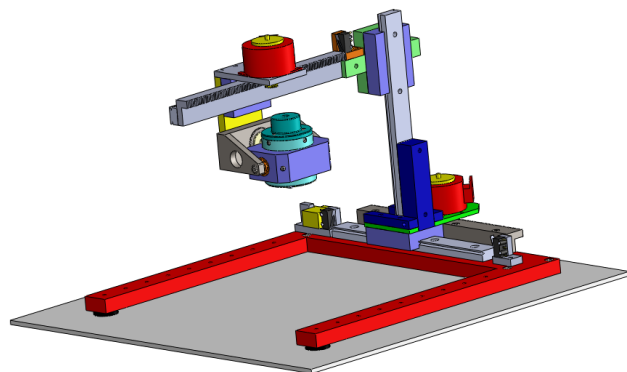
Linha	Profundidade [μm]
L1	400
L2	700
L3	1100
L4	1500
L5	1850
L6	2200
L7	2600
L8	3000
L9	3600
L10	4000

3.3 Dispositivos de Locomoção, Posicionamento e Fixação da Sonda

No âmbito deste trabalho foram desenvolvidas mesas de locomoção e posicionamento das sondas (Figura 3.12), tendo em vista satisfazer os requisitos de inspecção associados às cada vez mais exigentes condições de inspecção. O desenvolvimento dos meios de locomoção, teve em vista não só a sua utilização na realização dos trabalhos laboratoriais necessários para este projecto, como também aumentar o espólio disponível de dispositivos presentes no LTI do DEMI, para utilização em projectos futuros.



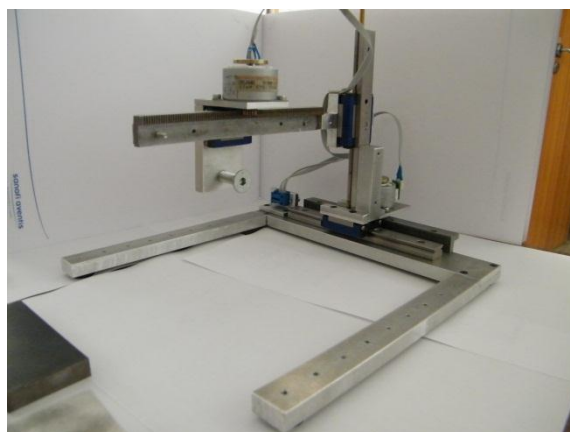
a)



b)



c)



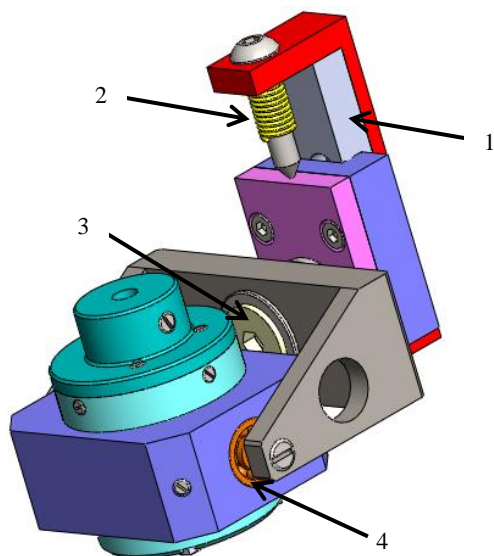
d)

Figura 3.12 – Dispositivos de locomoção e posicionamento desenvolvidos. a) Representação esquemática em desenho 3D da Mesa Delta; b) Representação esquemática em desenho 3D da Mesa Alpha; c) Fotografia da Mesa Delta; d) Fotografia da Mesa Alpha.

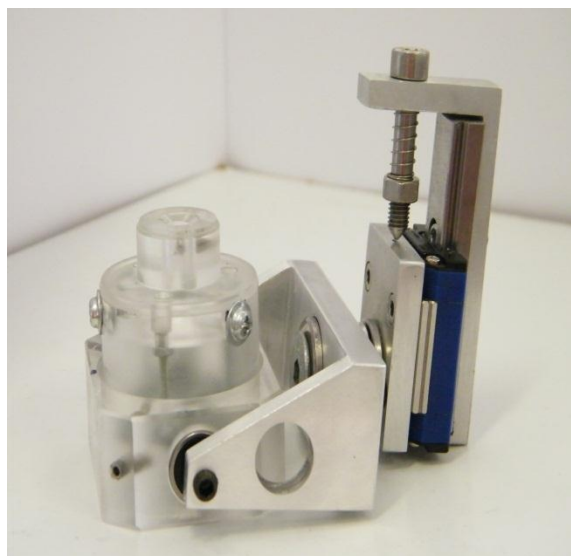
3.3.1 Suporte para Sondas

Foi também projectado e produzido um novo suporte de sondas (Figura 3.13), apto a ser acoplado a todos os chassis disponíveis, que possibilita uma mudança de sonda rápida e fácil.

O novo suporte produzido é caracterizado pelas seguintes cotas de atravancamento, 83 x 75 x 65 mm, é constituído por um mecanismo que permite compensações de movimentos verticais, por meio de um guia linear (Figura 3.13 (1)), auxiliado por uma mola que proporciona uma força constante da sonda sobre o material a inspeccionar e evita o *lift-off* (Figura 3.13 (2)) o suporte contém quatro rolamentos (2 axiais e 2 radiais) que possibilita a movimentação angular da sonda no caso de se dar uma inspecção em superfícies curvas, ou para compensar alguma irregularidade do material de inspecção (Figura 3.13 (3) e (4)). Todos os desenhos técnicos detalhados que permitem replicar o suporte encontram-se no Anexo A1.



a)



b)

Figura 3.13 - Nova configuração do suporte das sondas. a) Representação esquemática em desenho 3D do suporte das sondas; b) Foto do suporte das sondas.

1. Guia Linear
2. Mola
3. Rolamento Axial
4. Rolamentos Radial

3.3.2 Mesa Delta

A mesa designada “Delta” (Figura 3.14) foi concebida e projectada de acordo com as especificidades das inspecções a realizar tendo sempre em conta um tamanho tão reduzido quanto possível e possibilitando inspecções em provetes, de pequena, media ou grande dimensão. Fixo através de ventosas é de fácil transporte e de peso reduzido, de acordo com as características apresentadas na Tabela 3.7 e Tabela 3.8.

A mesa Delta é constituída por: i) uma base em alumínio que serve de suporte a todos os restantes componentes constituintes da mesa; ii) um guia linear que permite inspecções de 80 mm segundo o eixo X; iii) um *encoder* que permite controlar a posição da sonda; iv) três ventosas para fixação ao material a inspecionar; v) um motor passo-a-passo, com que acciona um pinhão de ataque; vi) dois apoios laterais ajustáveis em altura, que estabilizam o chassis; vii) ficha de 9 pinos. O motor transmite o movimento para o suporte de sondas através de um sistema de transmissão pinhão-correia.

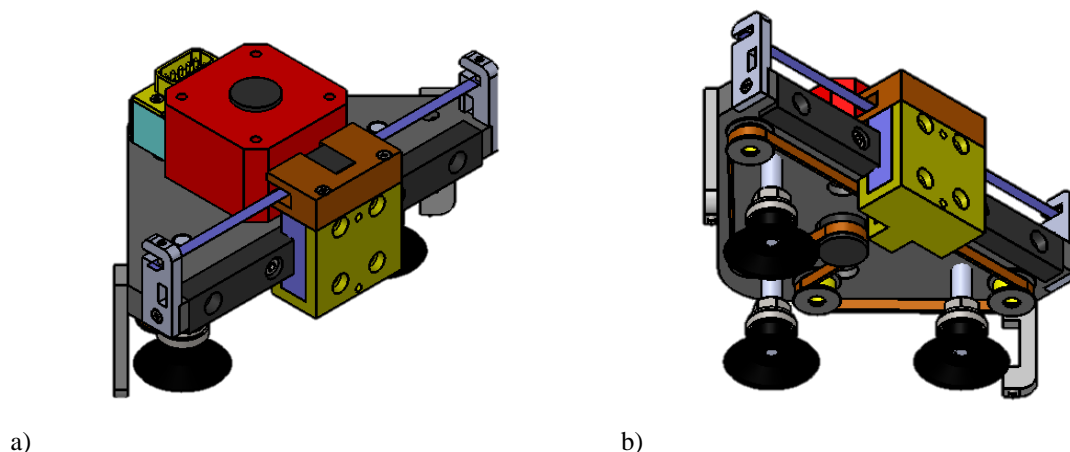


Figura 3.14 – Vistas em perspectiva da modelação da mesa Delta no *software* SolidWorks.

Este protótipo com o respectivo suporte da sonda tem cotas de atravancamento de 140 x 140 x 74 mm. São fornecidos no anexo A2 desenhos técnicos deste protótipo para a melhor compreensão dos seus componentes. A potência eléctrica é fornecida ao motor por uma placa *ASTROSYN Stepper Motor Drive*, modelo G-210 controlada pelo *software* LabVIEW 2011 e uma DAQ – 6008 da *National Instruments*, isto no caso das inspecções efectuadas no LTI. Em trabalhos realizados no Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC) do Instituto Superior Técnico (IST), utilizou-se o *hardware* dedicado das sondas *IOmic*, apresentado no em §3.4.2.

3.3.3 Mesa Alpha

Com a finalidade de reduzir ou eliminar alguns factores que se pensam prejudicar a qualidade dos ensaios e abranger diferentes condições de inspecção, como por exemplo, ensaios de 45° em relação ao cordão de SFL de forma rápida e prática, foi desenvolvida a Mesa Alpha com cotas de atravancamento 265 x 230 x 180 mm, realiza varrimentos no eixo X, Y e XY (45°), até 130 mm de comprimento (Figura 3.15), algumas outras características do protótipo podem ser observadas nas fichas técnicas na Tabela 3.7 e Tabela 3.8.

A Mesa Alpha apresenta dois modos de funcionamento distintos: i) inspecção de provetes com dimensões superiores às da mesa, através da fixação do chassis à superfície de inspecção com ventosas (Figura 3.15 a), e ii) inspecção de pequenos provetes de chapa fixos ao chassis da mesa (Figura 3.15 b)), ambos os casos passíveis de serem realizados com varrimentos a 45° (Figura 3.15 c)).

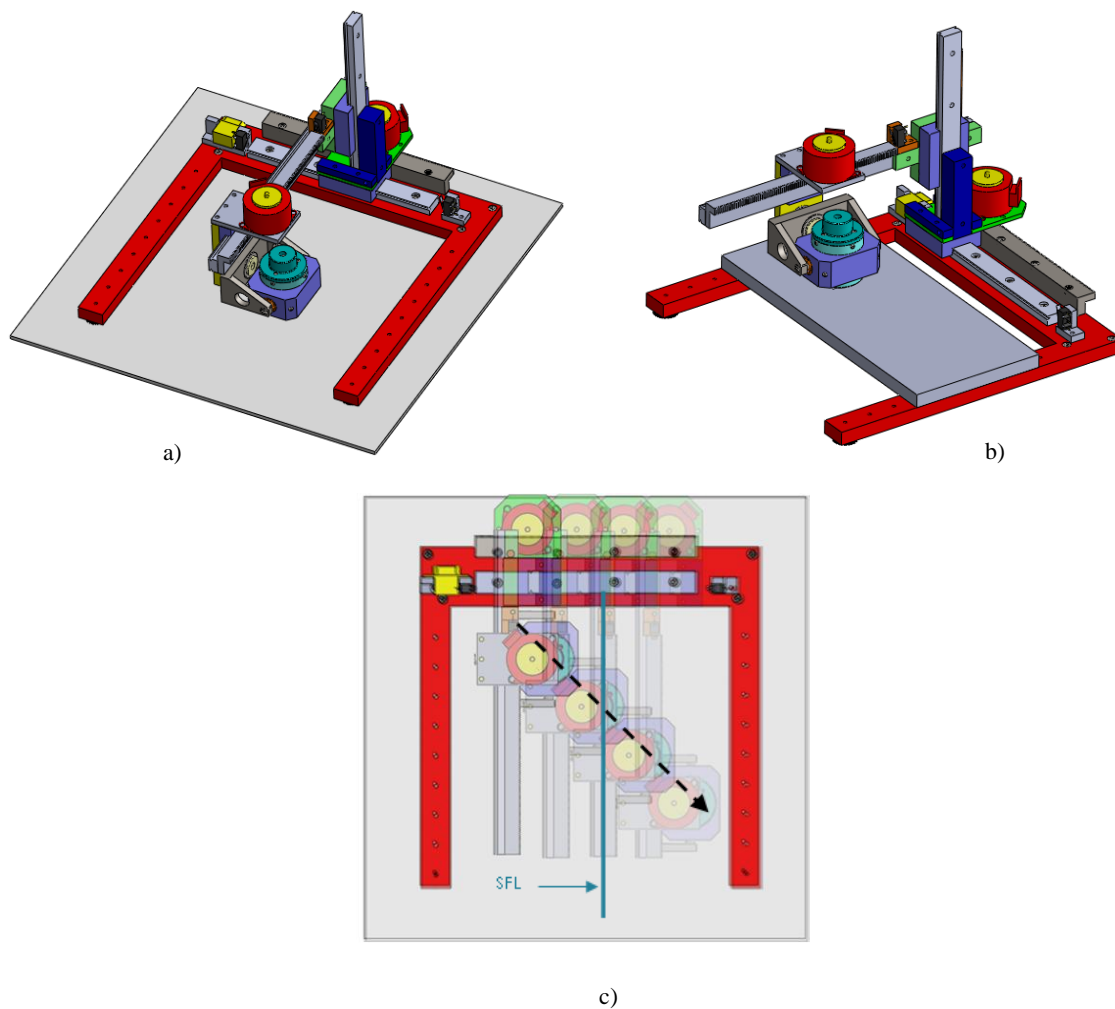


Figura 3.15 - Mesa Alpha: a) modo de inspecção a provetes de grande dimensão; b) modo de inspecção a provetes de dimensão reduzida; c) esquema de inspecção a 45° de cordão de SFL.

Projectada com uma nova configuração a Mesa Alpha, é constituída por: i) um chassis em alumino em forma de U; ii) dois guias lineares para deslocamento preciso da sonda; iii) dois motores passo-a-passo, que podem ser controlados individualmente ou em conjunto, dependendo do tipo de varrimento pretendido; iv) quatro ventosas para fixação a chapas de grande dimensão e v) ficha de 9 pinos para conexão ao restante *hardware*. Outra inovação da mesa Alpha prende-se com o facto de o sistema de transmissão mecânica dos motores de ambos os eixos ser do tipo pinhão-cremalheira, como se observa na Figura 3.12 d). Os desenhos técnicos de elementos relevantes para a replicação do equipamento encontram-se no anexo A3.

Tabela 3.7 – Características Técnicas

	Cotas de Atravancamento			Cotas de Inspeção		Posicionamento em altura [mm]	Peso [g]
	Comprimento	Largura	Altura	XX	YY		
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
Mesa Delta	140	87	71	80	0	90	692
Mesa Alpha	265	230	180	135	130	N\A	1770

Tabela 3.8 – Características do Sistema de Transmissão

Motor					Sistema de transmissão	
Marca/Modelo		Tipo	Alimentação	Nº de passos		
Mesa Delta	Epson/ EM-402	Bipolar	Passo-a-Passo	5 V	48	Correia Dentada
Mesa Alpha	(2) NMB/ PM35L-340	Bipolar	Passo-a-Passo	5V	48	Cremalheira

3.4 Descrição da Sonda de CI e Equipamento Electrónico

3.4.1 Descrição e Caracterização das Sondas

3.4.1.1 Sonda Convencional (*Pencil Probe*)

As chapas produzidas foram testadas com duas sondas absolutas convencionais *Pencil Probe* utilizando-se um equipamento comercial de inspeção por CI, Olympus Nortec 500, descrito no Capítulo §3.4.4.

Antes de ser dado início ao procedimento experimental, os parâmetros de inspeção foram ajustados, o valor do ganho afinado para que valor da impedância da bobina garantisse sensibilidade suficiente à sonda para detectar as irregularidades no material sem provocar a saturação electrónica do equipamento e otimizar os resultados recolhidos em todos os materiais.

Ajustados os parâmetros de inspeção (Tabela 3.9) e antes de ser dado início ao procedimento experimental foi sempre efectuada uma calibração inicial, que torna o valor da condutividade no

material base o valor de referência. É importante referir que os valores adquiridos nestes testes se referem à variação do valor absoluto da impedância ($Abs(Z)$) em relação ao valor de referência, uma alteração neste valor pode não significar contudo uma heterogeneidade no material em teste.

Tabela 3.9 - Parâmetros de teste utilizados nos ensaios das sondas Pencil Probe

Parâmetro	
Sonda	- OLYMPUS MTF905-60 50-500kHz - OLYMPUS P/500kHz-1MHz/A/90.5/6
f (kHz)	10, 25, 50, 100, 200, 500, 750, 1000, 2000 e 5000
Ganho (dB)	De 50 a 90, dependendo da frequência e do material
<i>Lift-off</i> (μm)	0, (alguns ensaios efectuados com 100 e 200)
Varrimento (mm)	80, para juntas bimetálicas 120, para defeitos em profundidade
Direcção	A maioria para a direita, mas foram realizados alguns ensaios em ambas as direcções (direita e esquerda) para validação de resultados
Resolução (μm)	100 (entre passos)
Duração (s)	62 (por varrimento)

Para melhores resultados laboratoriais, as *Pencil Probe* foram acopladas à Mesa Delta, através de um suporte desenvolvido para o efeito que pode ser observado na Figura 3.16, este suporte é constituído por três peças, uma chapa aparafusada com dois parafusos ao carro do barramento linear (Figura 3.16 (a)) que contem um rasgo para que o conjunto de fixação da sonda (Figura 3.16 (b)) seja ajustado em altura para varrimentos de provetes de diferentes espessuras.

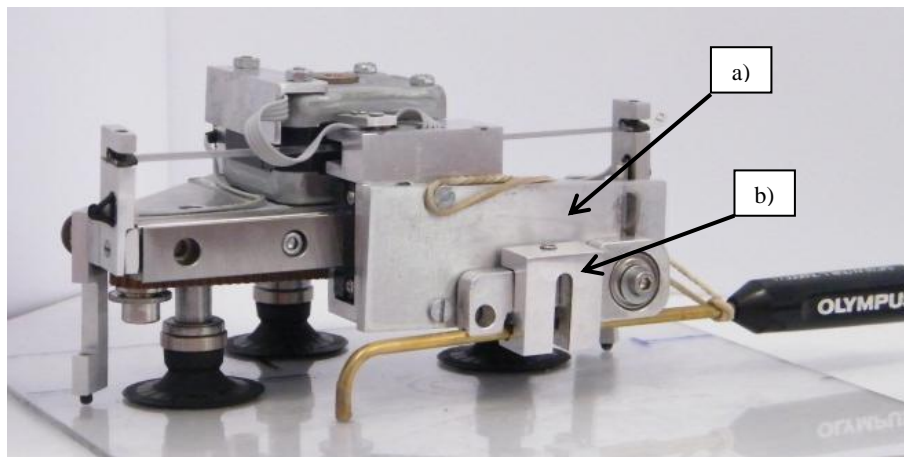


Figura 3.16 – Mesa Delta com suporte de sondas Pencil Probe. a) Chapa de suporte; b) Conjunto de fixação da sonda.

Todos os dados adquiridos pelo equipamento OLYMPUS foram transferidos através de um sistema de aquisição de dados multifuncional, DAQ-6008 para o *software* LabVIEW 2011 que recolheu, analisou, apresentou e armazenou os dados das avaliações experimentais. Na Figura 3.17 apresenta-se a interface gráfica do utilizador (GUI) do *software*, onde são controlados os parâmetros de deslocamento da sonda, mostrados os resultados de cada ensaio e guardados para tratamento posterior.

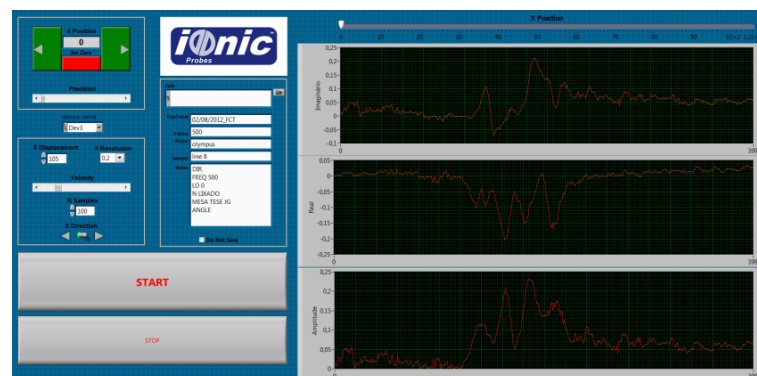


Figura 3.17 – Interface gráfica do utilizador do *software* LabVIEW.

3.4.1.2 Sondas IONic

A avaliação experimental das sondas *IONic* com o auxílio do *software* dedicado é muito menos complexa e morosa em comparação com os ensaios executados com o equipamento comercial, já que exclui a necessidade de ajustar ângulos e definir o valor de referência da inspeção, sendo a

sonda *IOnic* diferencial o seu valor de referência é zero quando a sonda esta posicionada sobre uma superfície homogénea.

As sondas *IOnic*, têm uma dimensão normalizada, 24 x 24 mm em substrato PCB, com o objectivo de todas poderem ser acopladas ao mesmo suporte de sondas, as restantes características eléctricas e físicas das sondas *IOnic*, são apresentadas na Tabela 3.10 e Tabela 3.11.

Os parâmetros mais relevantes para o comportamento das sondas são, o filamento de excitação e as bobinas sensíveis e da combinação destes resultam comportamentos distintos para cada sonda *IOnic*. Foram escolhidas para este trabalho experimental um conjunto de 8 sondas *IOnic*, com os parâmetros descritos na Tabela 3.10, para que quando comparados os resultados experimentais, possam ser determinados quais os parâmetros são mais relevantes para um bom desempenho das sondas em cada morfologia de defeito.

Tabela 3.10 - Descrição das características operacionais das sondas *IONic* utilizadas

Sonda	Filamento de Excitação			Bobinas Sensíveis			
	Comprimento [mm]	Largura [μm]	Posição [μm]	Largura e Espaçamento [μm]	Nº de Espiras	Diâmetro [mm]	
#2		10	1000	0	100	10	10
#11		10	1000	0	50	10	10
#12		10	1000	200	100	10	10
#13		10	1000	150	50	18	10
#14		7	1000	0	50	12	6
#15 ³		10	1000	150	50	20	10
#AB4		5	500	0	100	2	4
<i>IONic</i> com bobina		9	1000	0	100	8	12

³ Esta sonda apresenta duas camadas de bobinas sensíveis, um a 50 μm e outro no plano do filamento de excitação, a 150 μm

Tabela 3.11 - Características eléctricas e físicas das sondas *IOnic*

Sonda	Características Eléctricas		Características Físicas		
	Resistência eléctrica do filamento de excitação [Ω]	Resistência eléctrica das bobinas sensíveis [Ω]	Plano de massa [Ω]	Espessura do PCB [μm]	Peso [g]
2	0.19	3.95	0.18	1600	1.78
11	0.22	22.95	0.21	1600	1.77
12	0.25	4.18	0.21	1200	1.35
13	0.25	17.63	0.21	1200	1.34
14	0.23	7.04	0.21	1200	1.34
15	0.25	69.55	0.21	1200	1.34
16	0.26	36.23	0.20	1200	1.34
AB4	0.28	1.14	0.21	1600	1.98
<i>IOnic</i> com Bobina	1.91	3.80	0	1200	4.60

É importante referir, tal como nos ensaios realizados com as sondas convencionais, que antes de serem iniciados os ensaios, foi necessário afinar os parâmetros de inspecção nomeadamente o ganho, para isso posicionou-se a sonda sobre uma zona da chapa a inspecionar onde se sabia *a priori* estar localizado um defeito e de seguida estimado o valor máximo do ganho que se poderia utilizar na inspecção sem que a tensão de saída da sonda não atingisse valores que levassem à saturação do equipamento, garantindo desta forma a sensibilidade máxima da sonda e a obtenção de resultados de qualidade.

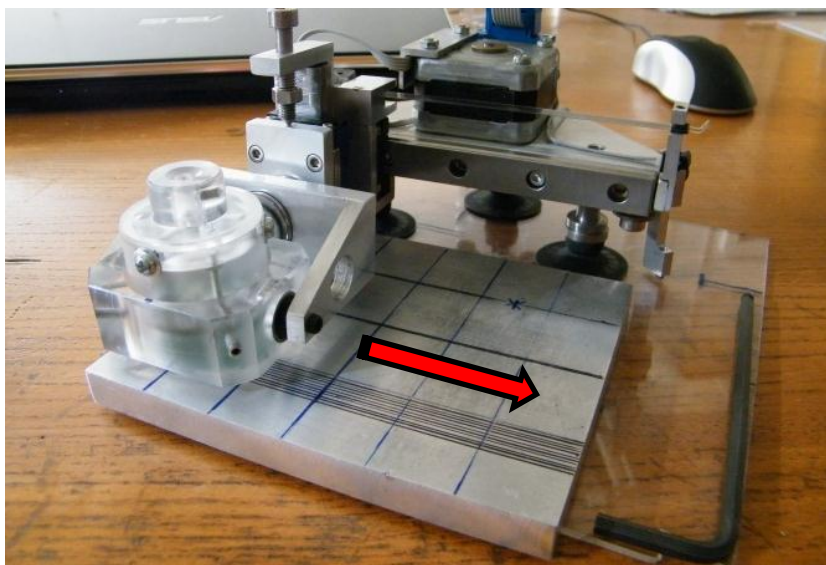


Figura 3.18 – Mesa Delta em inspecção com indicação da direcção de inspecção (a vermelho).

Conhecido o valor do ganho a utilizar para cada uma das frequências de inspecção, iniciaram-se os ensaios laboratoriais (Figura 3.18), cujos parâmetros estão devidamente especificados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Parâmetros de ensaio das sondas *IONic*

Parâmetros	
Sondas	Descritas na Tabela 3.10
f (MHz)	10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 e 5000
Ganho (dB)	De 35 a 77 dB, dependendo da frequência e do material
<i>Lift-off</i> (μm)	0, para provetes com defeitos paralelos e em profundidade. 200, para juntas bimetálicas.
Varrimento	80, para juntas bimetálicas. 120, para defeitos em profundidade.
Direcção	A maioria para a direita, mas foram realizados alguns ensaios em ambas as direcções (direita e esquerda) para validação de resultados.
Resolução (μm)	100 (entre passos)
Duração (s)	60 (por varrimento)

3.4.2 Dispositivos Electrónicos Dedicados Para a Sonda *IONic*

O facto de a sonda *IONic* ser constituída por um único filamento de excitação plano, implica que que é necessário injectar uma amplitude de corrente muito superior, do que a necessária para induzir um campo magnético equivalente ao que seria obtido usando uma bobina de excitação toroidal, no qual o campo magnético resultante é a soma das contribuições individuais de cada espira. Por esta razão é necessário um amplificador operacional para injectar no filamento de excitação uma intensidade de corrente na ordem de 1 A, para assim se obter um campo magnético primário H_p intenso o suficiente para gerar o campo magnético adequado. Esta corrente terá de ser constante numa largura de banda entre os 10 KHz e 10 MHz, este é um aspecto difícil de concretizar do ponto de vista tecnológico, nomeadamente devido ao aparecimento de ruído e fenómenos de *slew rate* ⁴. Um outro importante aspecto deste dispositivo electrónico está relacionado com a precisão com que é calculado o valor da amplitude e a diferença na fase da

⁴ Slew rate, em Português velocidade de varrimento, define-se como a velocidade de resposta de um amplificador instrumental a uma variação de tensão na entrada, este valor na teoria deveria ser infinito, o que na realidade não acontece. Logo conclui-se que quanto maior for o valor deste parâmetro melhor será o amplificador instrumental.

tensão induzida U_{out} aos terminais das bobinas sensíveis da sonda *IONic* [12]. Este foi o sistema utilizado para realizar todas as inspecções com a sonda *IONic* nesta dissertação.

O dispositivo electrónico foi desenvolvido numa colaboração prévia com o DEEC do IST. Este *hardware* foi desenvolvido exclusivamente para a sonda *IONic* [13], explorando assim todas as capacidades da mesma. O sistema é constituído por um núcleo de processamento baseado num dispositivo de lógica programável que gera e analisa os sinais da sonda, através de algoritmos digitais de processamento de sinal. A comunicação com os meios computacionais é feita através de *Ethernet* 10/100 ou *USB 2.0 High Speed*. A arquitectura do sistema permite múltiplas combinações de periféricos para a geração e aquisição dos sinais da sonda.

A aquisição de sinais é garantida por um amplificador de ganho programável e um conversor analógico-digital enquanto a geração de sinais é obtida por um conversor digital-analógico e um amplificador de transcondutância com elevada saída de corrente. Esta configuração do sistema é adequada para efectuar inspecções com frequências a variar entre os 50 KHz e os 10 MHz. A electrónica dedicada para a sonda *IONic* (Figura 3.19) é composta por, um chassis principal concebido em PCB e denominado por *ECScan* que controla as placas secundárias: *IONic Driver Card*, *IONic Aquisition Card* e o controlo dos meios de locomoção da sonda.



Figura 3.19 – *Hardware* dedicado *IONic*.

3.4.3 Software LabVIEW

O software LabVIEW foi especificamente desenvolvido para coordenar todos os elementos do sistema de END por CI descrito no ponto anterior [14]. Foi utilizada a linguagem de programação, do ambiente LabVIEW 2011 da *National Instruments*, devido à sua elevada capacidade na aquisição, processamento e análise de dados em tempo real e também à facilidade de criação de uma *Graphical System Interface* (GUI).

Na Figura 3.20 apresenta-se a GUI do programa do equipamento dedicado de END. Nesta janela é possível controlar todos os parâmetros de teste da *IONic*, assim como a observação em tempo real dos resultados gráficos 1D e 2D do sinal da sonda.

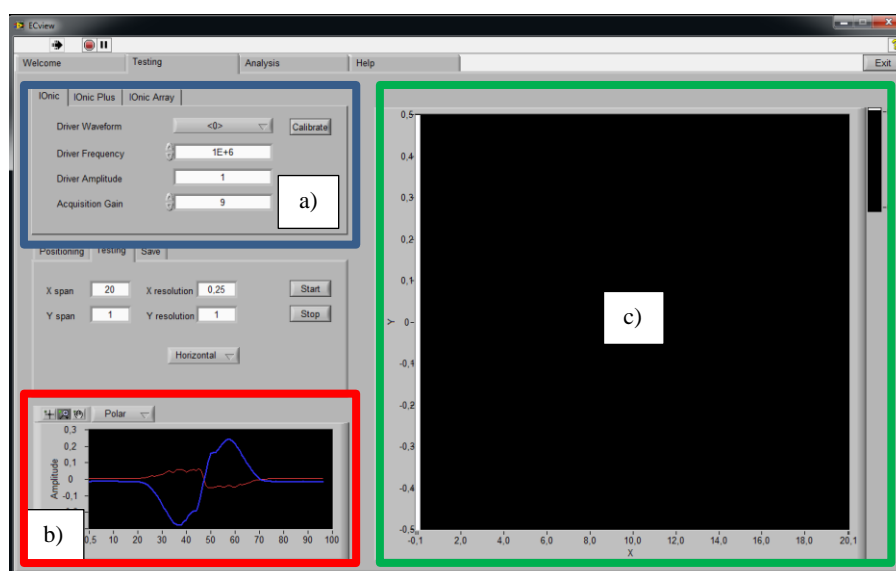


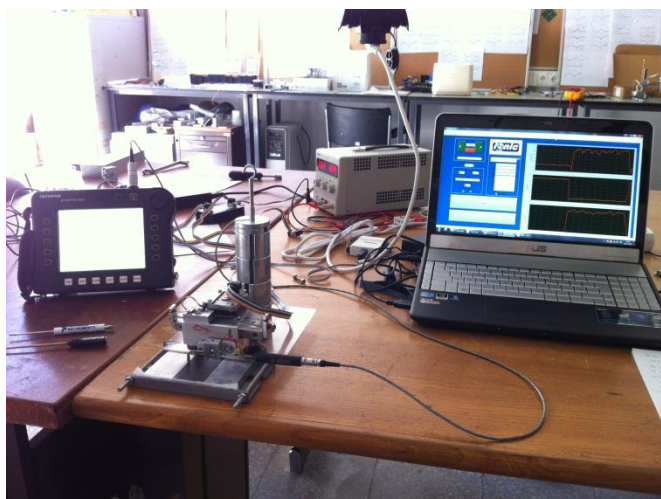
Figura 3.20 - Interface gráfica de controlo do sistema de END: a) Área de configuração dos parâmetros de teste; b) Gráfico 1D do sinal real e imaginário; e c) C-Scan.

3.4.4 Equipamento OLYMPUS (Nortec 500)

O equipamento da OLYMPUS, Nortec 500 (Figura 3.21 (a)) foi, como referido anteriormente, o equipamento utilizado na avaliação de provetes com as sondas *Pencil Probe*. É um equipamento de END por CI comercial da marca OLYMPUS, capaz de operar numa gama de frequências entre os 50 Hz e os 12 MHz, ganho até 90 dB ajustável e com incrementos de 0.1dB e ângulo variável de 0° - 359° ajustável de 1° em 1° [5].



a)



b)

Figura 3.21 – Equipamento de END convencional: a) Nortec 500; e b) Aparato laboratorial.

3.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o aparato laboratorial necessário para a execução dos trabalhos experimentais desta tese, assim como os processos de desenvolvimento do mesmo.

Efectuou-se uma descrição dos materiais utilizados não produção de provetes, assim como o processo de produção e descrição dos métodos de inspecção específicos definidos para cada uma das três morfologias de defeitos a avaliar.

Foram desenvolvidos e descritos os meios adequados para o funcionamento das sondas, nomeadamente: i) o suporte de sondas universal; ii) os dois novos chassis de locomoção e posicionamento de sondas, Mesa Delta e Mesa Alpha e iii) uma descrição detalhada dos factores de projecto tidos em consideração, informações técnicas e procedimento de produção dos mesmos.

Apresentou-se toda a informação relativa às condições laboratoriais. Primeiramente foram descritos os dois tipos de sondas utilizados (sonda absoluta convencional e sonda *IOnic*) e respectivos parâmetros de teste. Apresentaram-se os dispositivos electrónicos utilizados nos trabalhos laboratoriais, seguida por uma apresentação do *software* de controlo desses dispositivos electrónicos e por fim, as informações técnicas do equipamento comercial de END por CI Nortec 500.

4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.1 Introdução

O objectivo da apresentação das modelações numéricas descritas no presente capítulo prende-se com a necessidade de perceber o comportamento da sonda *IONic* sobre defeitos paralelos à superfície do material. Outro aspecto importante das simulações numéricas foi dar a conhecer o comportamento desta mesma sonda em provetes bimetálicos e em provetes onde se fez variar a profundidade e o diâmetro de um furo.

Numa primeira fase estudou-se o comportamento da sonda *IONic* através de simulações numéricas. Pretendeu-se observar o comportamento das CI e o modo como estas circulam no material a inspeccionar. Para o efeito recorreu-se a um estudo anteriormente realizado [11], que mostra o comportamento da intensidade e a disposição espacial do campo magnético primário (H_p) junto à zona da superfície de inspecção, tornando-se assim possível a previsão da área de circulação das CI.

Com os conhecimentos adquiridos em [11] configuraram-se as duas sondas usadas nas simulações (*IONic* #12 e AB4) e as respectivas condições de inspecção a simular, provetes bimetálicos, provetes de defeitos artificiais em profundidade (furos) e os provetes com defeitos paralelos à superfície de inspecção.

Através deste estudo pretende-se perceber qual a capacidade de detectar com a sonda *IONic* defeitos que se encontrem paralelos à superfície, perceber qual a profundidade máxima a que a sonda *IONic* consegue detectar um defeito artificial pontual e qual o seu diâmetro. Perceber o comportamento da sonda numa inspecção onde o material varia ao longo da inspecção e repetir este mesmo ensaio mas com uma pequena abertura entre os dois materiais (que simula uma junta não perfeitamente unida), para o aproximar o resultado da simulação o mais possível da realidade.

4.2 Descrição do Modelo de Simulação

Na Figura 4.1 está representado o modelo geométrico do provete de furos para a sonda AB4, que consiste num único volume de material com 14x14x10 mm com as propriedades eléctricas e magnéticas do alumínio AA2024-T351. Os furos apresentam três diâmetros: 0.5, 1 e 2 mm e estão afastados da superfície de 100 μ m até 500 μ m. Os elementos de malha criados para as simulações são hexaédricos, com malha refinada na zona das bobinas sensíveis e na zona do furo, o que permite obter uma melhor análise dos fenómenos envolvidos. A malha para o modelo da sonda AB4 tem cerca de 550.000 elementos.

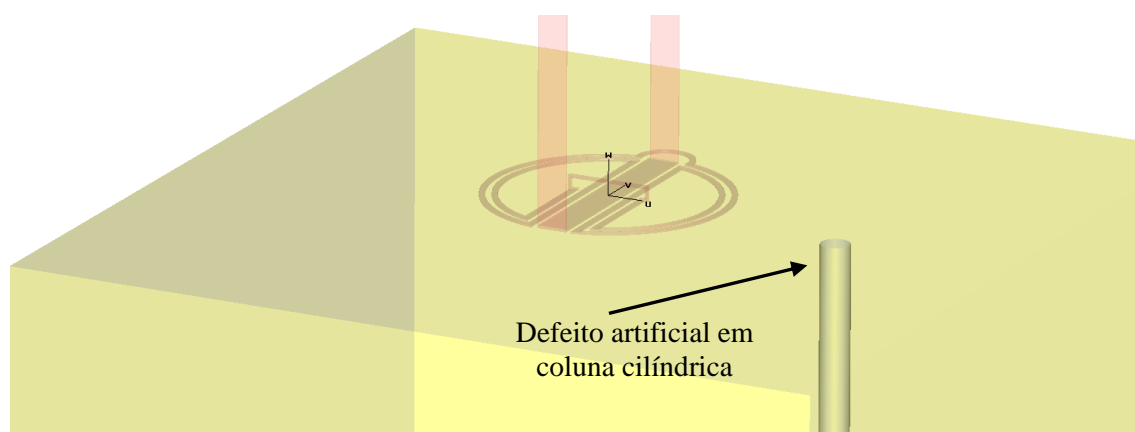


Figura 4.1 - Modelo geométrico do provete de furos para a sonda AB4.

O modelo geométrico do provete de furos para a sonda #12 apresenta um modelo de volume de material de 24x20x10 mm com as propriedades eléctricas de um alumínio AA2024-T351. Os elementos de malha criados para as simulações são hexaédricos com malha refinada na zona das bobinas sensíveis e na zona do furo, o que permite obter uma melhor análise dos fenómenos envolvidos. A malha para o modelo da sonda #12 tem cerca de 737.000 elementos.

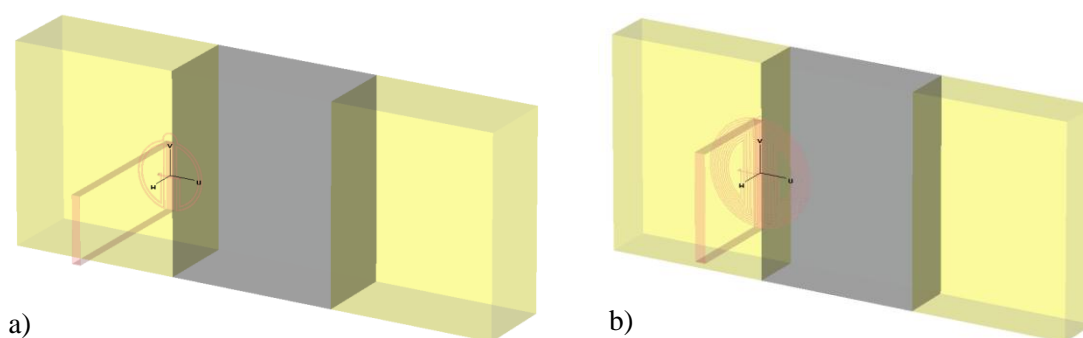


Figura 4.2 – Modelo de geométrico de MEF: a) para juntas bimetálicas com a sonda AB4; b) para juntas bimetálicas com a sonda #12.

Foram criados quatro modelos de simulação para cada uma das sondas. Na Figura 4.2 a) representa-se o modelo geométrico criado para simular as juntas bimetálicas, sem ar entre os diferentes materiais, para a sonda AB4, e na Figura 4.2 b) o modelo para a sonda #12. Foram criados dois modelos de simulação para se economizar tempo de cálculo, uma vez que o modelo geométrico da sonda #12 é aproximadamente o dobro do criado para a sonda AB4. O modelo criado para a sonda AB4 consiste em três volumes de material com 10x12x5 mm com as propriedades eléctricas de um material genérico ao qual foram posteriormente dadas as propriedades eléctricas dos diferentes materiais simulados, permitindo assim fazer combinações diferentes de juntas bimetálicas. O modelo criado para a sonda #12 é constituído por três volumes de material com 15x20x5 mm, tendo também estes as propriedades eléctricas de um material genérico. O material de fundo que envolve o volume de material e a sonda tem características eléctricas do ar e encontra-se afastado 1 mm de todas as restantes dimensões como se mostra na Figura 4.3. Esta característica da simulação aplica-se a todos os modelos simulados.

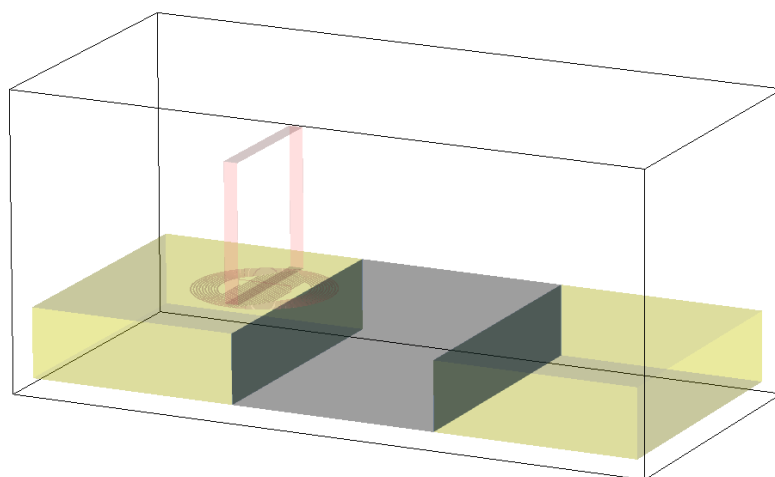


Figura 4.3 - Modelo geométrico do provete para a sonda #12, com volume de material envolvente com as características eléctricas do ar.

As sondas têm as características geométricas descritas no ponto 3.4.1, e o seu filamento de excitação é atravessado por uma corrente eléctrica alternada de intensidade I com uma frequência f . Os elementos de malha criados para as simulações são hexaédricos. A malha é refinada na zona das bobinas sensíveis o que permite obter uma melhor análise dos fenómenos envolvidos. Para o modelo da sonda AB4 a malha tem cerca de 830.000 elementos (Figura 4.4 a)), já no modelo da sonda #12 o número de elementos é cerca de 1.610.000 (Figura 4.4 b)).

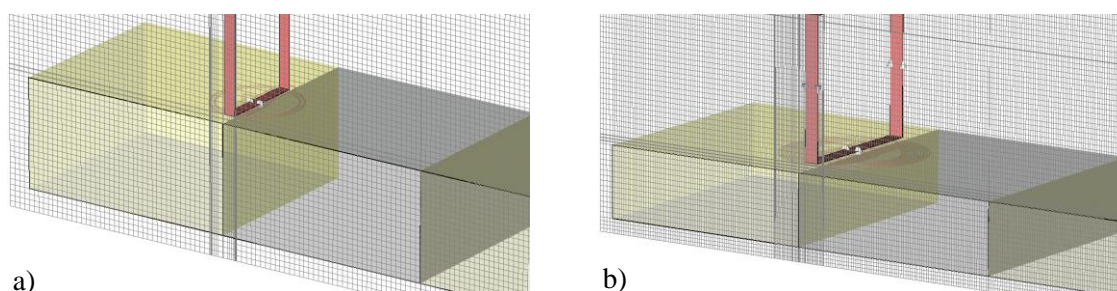


Figura 4.4 – Elementos de malha dos modelos geométricos: a) malha com 830.000 elementos para sonda AB4; e b) malha com 1.610.000 elementos para sonda #12.

Foram criados mais dois modelos de juntas bimetálicas, com a particularidade de apresentarem uma faixa de ar entre os blocos de material. Com este tipo de simulação pretende-se avaliar uma vez mais o comportamento da passagem da sonda de um material com uma condutividade para outro e aproximar a simulação de uma realidade física, a de não existirem duas juntas perfeitamente acopladas, criando assim um defeito de 50 μm entre as juntas bimetálicas (Figura 4.5).

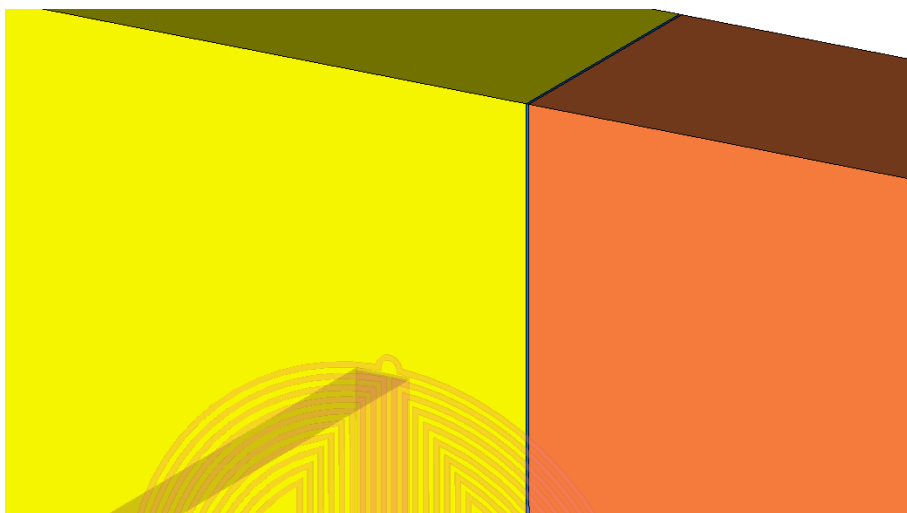


Figura 4.5 – Pormenor de modelo geométrico com bloco de 50 µm entre na junta bimetalica.

O modelo geométrico para defeitos paralelos está representado na Figura 4.6. O volume de material a ser inspeccionado pela sonda AB4 tem 20x14x5 mm, e para a sonda #12 tem 30x20x5 mm, ambos com as propriedades eléctricas do alumínio AA2024-T351. O defeito paralelo à superfície ocupa metade do provete, como se mostra na Figura 4.6, e tem uma altura de 50 µm. O defeito paralelo apresenta as características do ar e está afastado da superfície de 50 µm até 1050 µm.

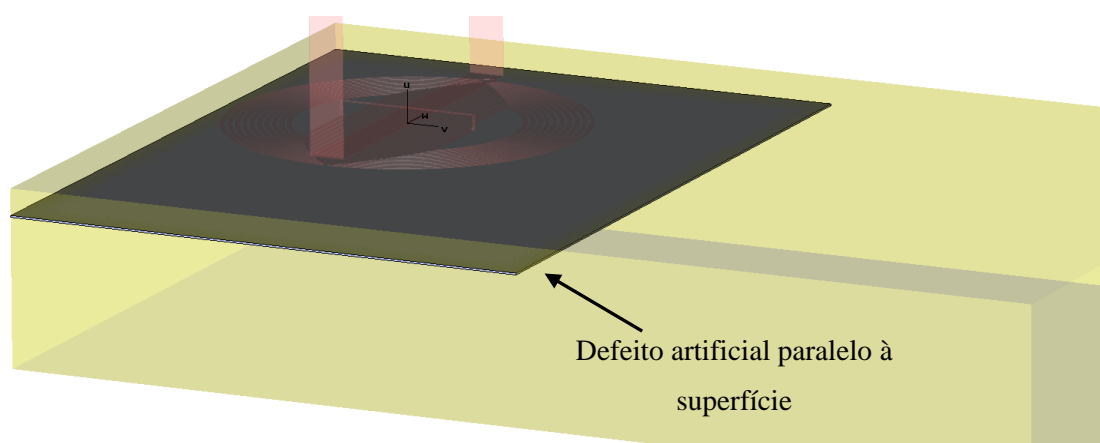


Figura 4.6 - Modelo geométrico para defeitos paralelos.

Os elementos de malha criados para as simulações são hexaédricos de malha refinada na zona das bobinas sensíveis e na zona do defeito, o que permite obter uma melhor análise dos fenómenos envolvidos. A malha para o modelo da sonda AB4 tem cerca de 942.000 elementos e para a sonda #12 tem cerca de 1.242.000 elementos.

Estratégia de simulação

Para uma melhor estratégia de simulação dos quatro modelos de provetes, recorreu-se a um estudo anteriormente realizado [11]. Este estudo mostra qual o tamanho de bloco para cada uma das sondas, o espaçamento entre aquisições, o *Lift-off* das bobinas sensíveis ao material base, as frequências de simulação e a corrente que atravessa o filamento de excitação (ver Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Estratégia de simulação.

Condições de simulação			Parâmetros de simulação	
Bloco de material base	<i>Lift-off</i> da Sonda	Espaçamento entre aquisições	Frequências	Corrente I
3/2 Ø	200 µm	ΔX= 100 µm	200 kHz 1000 kHz 5000 kHz	1 A

4.3 Juntas Bimetálicas

Foi também importante perceber o comportamento da sonda *IONic* quando existe uma inspecção em que a sonda atravessa materiais com características diferentes. Para se proceder a este tipo de análise criou-se um provete bimetalico composto por três blocos.

Este estudo, embora não estando directamente relacionado com a aplicação prática de END, tem interesse na medida que permite caracterizar e compreender o comportamento da sonda numa condição artificial, por exemplo para:

- i) Avaliar o efeito da frequência numa situação de desequilíbrio máximo entre as duas bobinas sensíveis da sonda;
- ii) Determinar as posições da sonda para as quais o efeito de bordo e a presença de outros materiais já se faz sentir;

- iii) Confirmar a simetria geométrica da sonda e o equilíbrio dos campos magnéticos, incluindo o efeito dos cabos;
- iv) Avaliar a capacidade da sonda para localizar com precisão a localização de juntas bimetálicas.

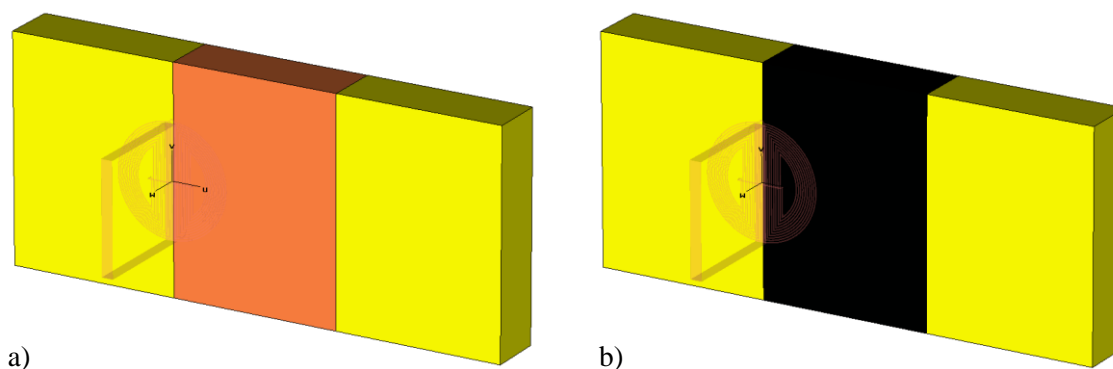


Figura 4.7 – Modelos geométricos de simulação de juntas bimetálicas: a) junta Al – Cu – Al; b) junta Al- Aço - Al.

Realizaram-se duas simulações. Na primeira, a sonda inicia a inspeção num bloco de alumínio, atravessa um bloco de cobre puro (condutividade maior que a do alumínio) e termina novamente em um bloco de alumínio (Figura 4.7 a)). O intuito de fazer a sonda avançar novamente para um bloco de alumínio depois de estar totalmente sobre o bloco de cobre foi simular uma inspeção onde a sonda inicia a aquisição sobre um material de condutividade mais elevada do que aquele onde vai terminar. No fundo, pretende-se analisar o comportamento da sonda quando existem variações das características físicas dos materiais. Na segunda inspeção, com o mesmo objectivo o bloco central de cobre foi substituído por um aço com propriedades eléctricas semelhantes às de um ST37 de condutividade menor e permeabilidade magnética relativa (μ_r) muito superior à do alumínio (Figura 4.7 b)).

Apresentam-se de seguida na Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10 os resultados das simulações descritas acima, para as sondas *IONic* #12 e AB4.

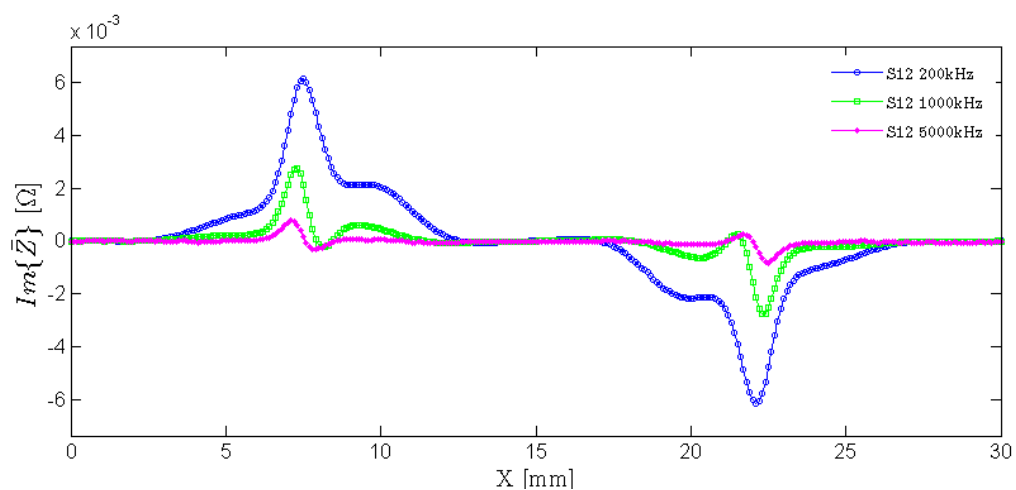


Figura 4.8 – Deslocamento da sonda #12 na junta bimetalica sem defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz

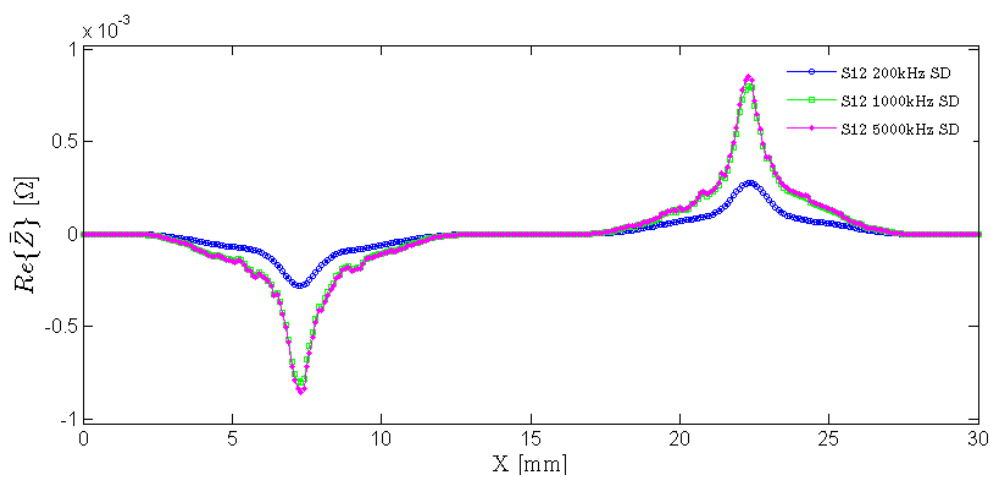


Figura 4.9 - Deslocamento da sonda #12 na junta bimetalica sem defeito Al – Cu - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz.

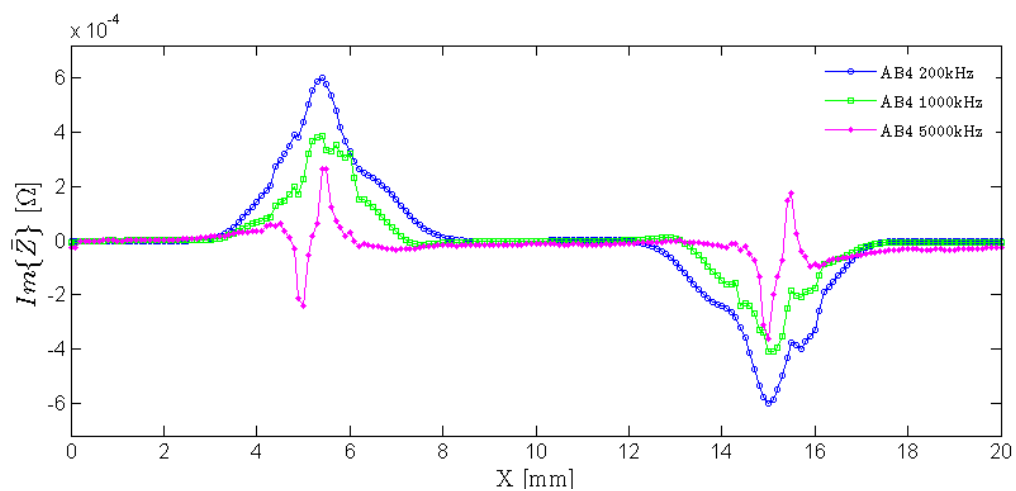


Figura 4.10 - Deslocamento da sonda AB4 na junta bimetalica sem defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz

Verifica-se através da Figura 4.8 e Figura 4.9 que o sinal de resposta da sonda #12 ao atravessar os diferentes materiais não apresenta o sinal característico de um defeito, aparecendo apenas um pico em cada uma das interfaces entre os dois materiais, originado pelas diferentes características dos materiais. Os resultados numéricos para a sonda AB4 (Figura 4.10) não oferecem a mesma facilidade de interpretação, pois apresenta dois comportamentos distintos, nas frequências de 200 e 1000 kHz pode observar-se o sinal constituído por apenas um pico referente à mudança de material, mas a frequências diferentes o comportamento já se assemelha ao sinal característico de um defeito no material, este facto deve-se à sonda AB4 ser de muito reduzida dimensão e conter apenas duas espiras nas bobinas sensíveis, o que reduz a resolução espacial da sonda e origina à frequência de 5000 kHz uma mudança abrupta no sinal, para uma melhor compreensão deste fenómeno dever-se-ia refinar a malha e fazer-se um estudo mais aprofundado sobre os resultados.

Devido ao facto de os resultados conseguidos nestas simulações, terem o objectivo de validar os resultados laboratoriais e conseguir em condições reais encostar perfeitamente os provetes ser uma tarefa bastante difícil, repetiram-se então as simulações descritas nos parágrafos anteriores, separando-os agora com um pequeno volume de ar de 50 μm espessura como mostra a Figura 4.5. O objectivo desta simulação é obter condições de inspecção aproximadas à realidade, e mostrar se há diferenças significativas no sinal da sonda em comparação com os resultados anteriores e o sinal resultante dessas mesmas simulações apresenta-se na Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13.

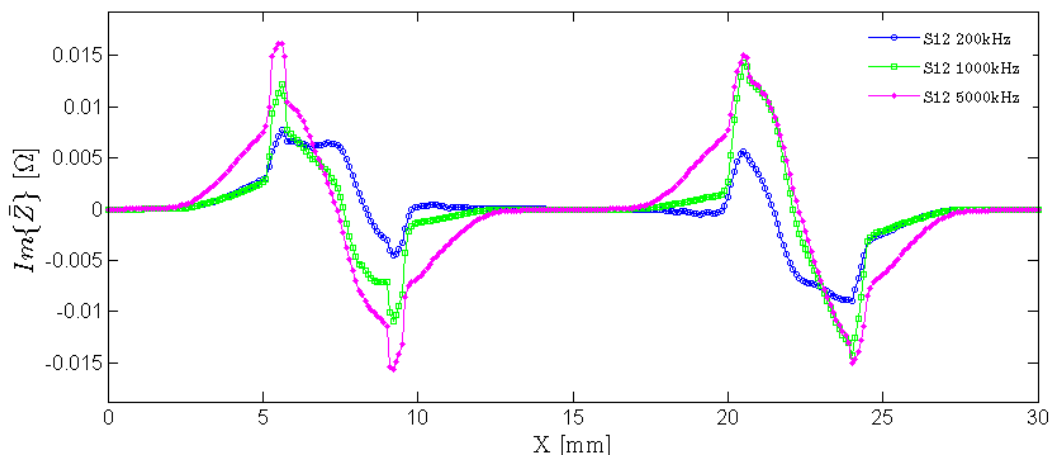


Figura 4.11 - Deslocamento da sonda #12 na junta bimetálica com defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz

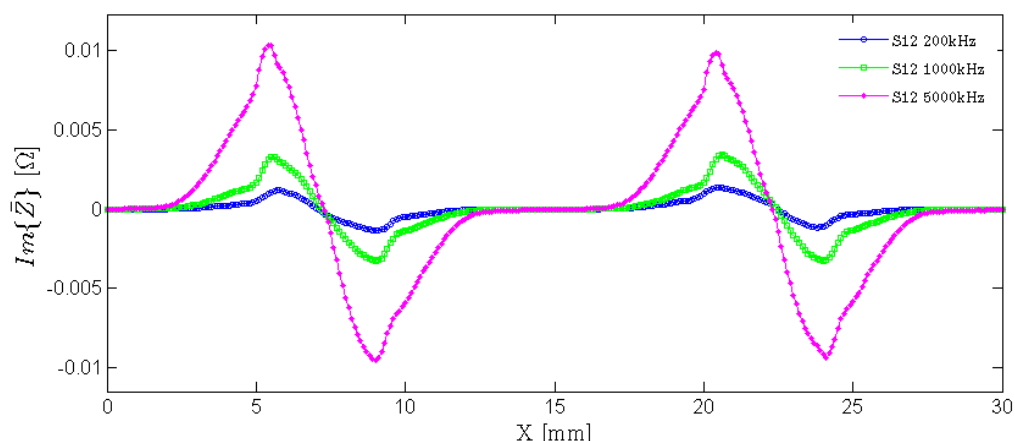


Figura 4.12 - Deslocamento da sonda #12 na junta bimetálica com defeito Al – Cu - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz~

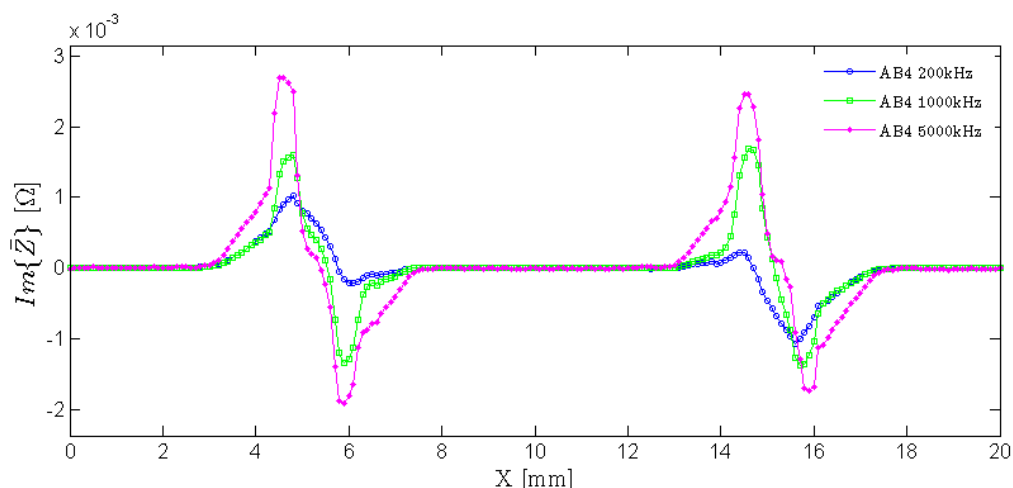


Figura 4.13 - Deslocamento da sonda AB4 na junta bimetálica com defeito Al – Aço - Al às frequências de 200, 1000 e 5000 kHz

Apresentam-se agora na Figura 4.14 e Figura 4.15 as comparações das simulações com e sem defeito para ambas as sondas. Analisando uma e outra curva (com e sem o afastamento de 50 μm entre os provetes) percebe-se uma modificação clara nos sinais de ambas as sondas. O ar entre os blocos provoca no sinal o comportamento sinusoidal característico observado na passagem da sonda sobre um defeito em material base, combinado com o efeito observado nas simulações sem defeito devidas à mudança de propriedades físicas dos materiais.

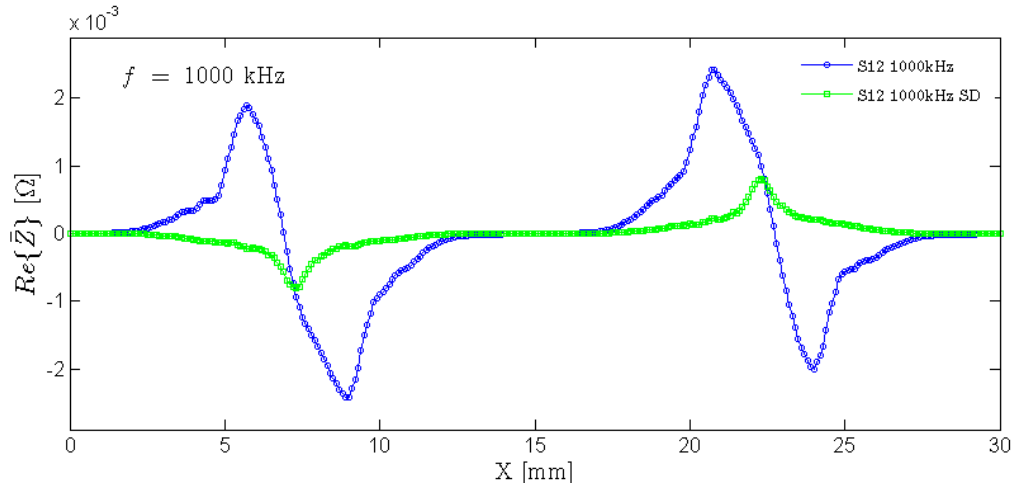


Figura 4.14 - Comparação do sinal do deslocamento da sonda #12 na junta bimetálica com defeito e sem defeito Al – Cu - Al à frequência de 1000 kHz

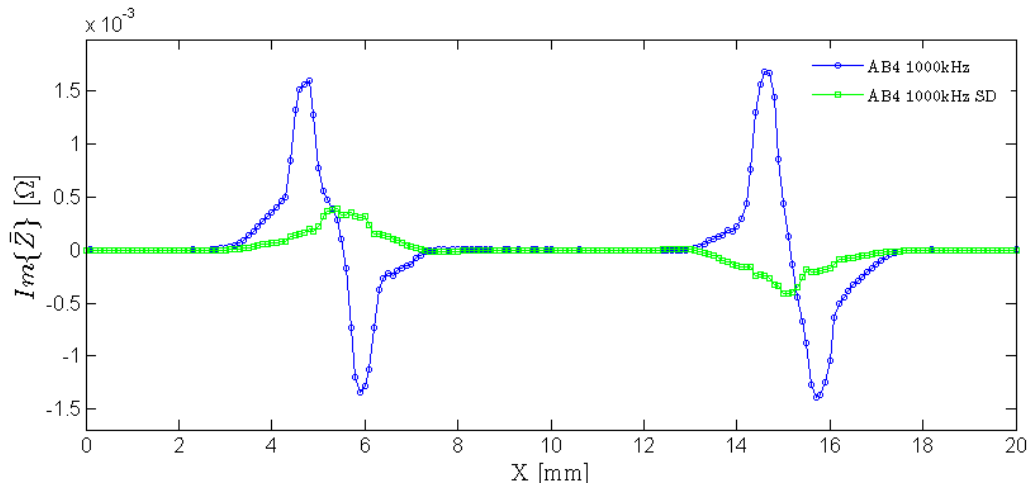


Figura 4.15 – Comparação do sinal do deslocamento da sonda AB4 na junta bimetálica com defeito e sem defeito Al – Aço - Al à frequência de 1000 kHz

4.4 Defeitos em Profundidade

Os defeitos em profundidade permitiram perceber, qual a profundidade a que as CI atingem no material base. Esta avaliação corresponde ao aumento distância a que a base do furo se encontra da superfície de inspeção. Uma primeira avaliação passou por perceber a diferença de sinal da sonda quando esta passa por diferentes diâmetros de furos. Estas simulações foram feitas para a sonda AB4 e para a sonda #12, os resultados apresentam-se na Figura 4.16 e Figura 4.17.

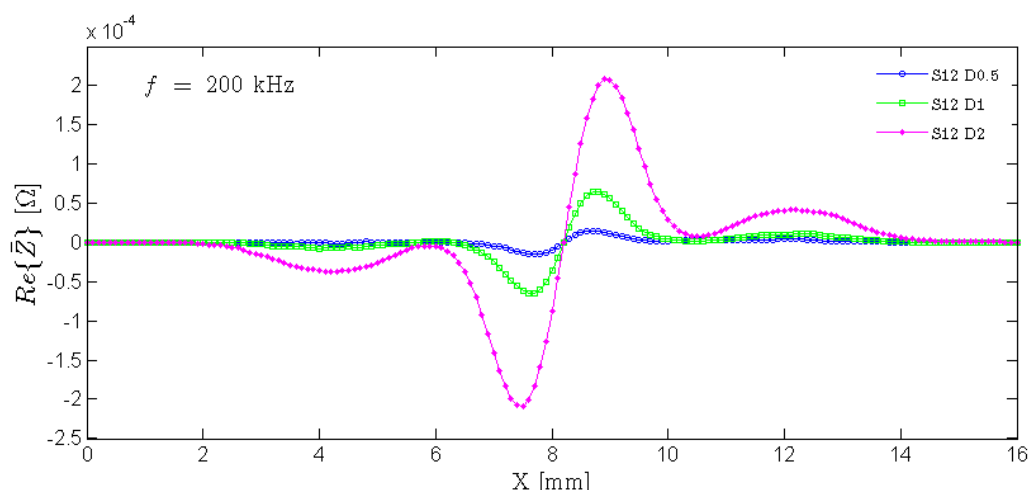


Figura 4.16 – Resultado numérico da sonda #12 ao atravessar um defeito a 100 μm de profundidade, para os diâmetros de furo D0.5, D1 e D2 @ $f = 200 \text{ kHz}$.

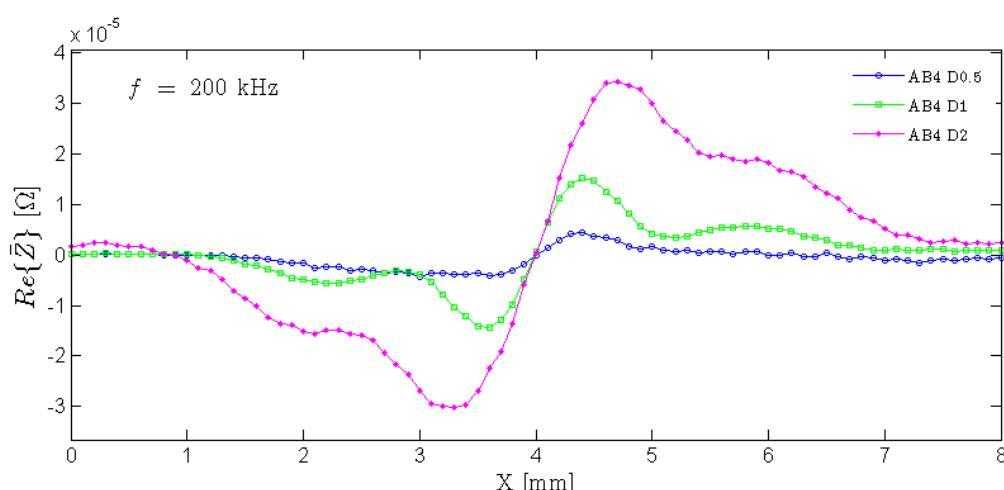


Figura 4.17 - Resultado numérico da sonda AB4 ao atravessar um defeito a 100 μm de profundidade, para os diâmetros de furo D0.5, D1 e D2 @ $f = 200 \text{ kHz}$.

Os resultados obtidos nestas simulações apresentam como era esperado, o sinal resultante a aumentar proporcionalmente com o aumento do diâmetro do furo (D0.5, D1 e D2 representam diâmetros de furo de 0.5, 1 e 2 mm respectivamente), este facto deve-se a que, quanto maior for o diâmetro do furo maior será o volume de ar, o que origina maiores variações na circulação das CI no material base, que por sua vez se traduz em maiores amplitudes de sinal.

Os resultados da Figura 4.18 e Figura 4.19 representam a passagem das sondas por um defeito D1 a 100 μm de profundidade. Da análise gráfica percebe-se que com o aumento da frequência a amplitude do sinal diminui. Isto deve-se à menor profundidade de penetração das correntes induzidas com o aumento da frequência. O aumento da frequência leva a uma maior concentração dos campos à superfície do material a inspeccionar.

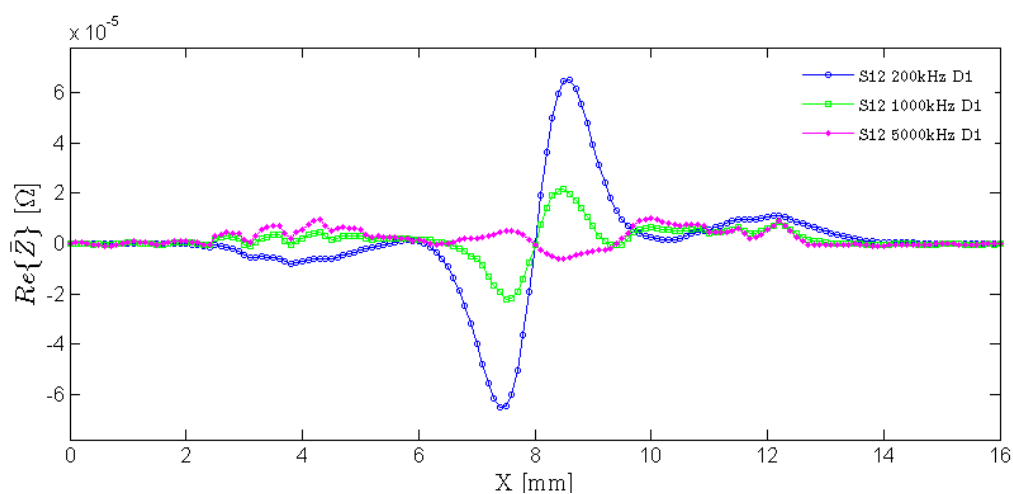


Figura 4.18 - Resultado numérico da sonda #12 a atravessar um defeito D1 a 100 μm de profundidade @ $f = 200, 1000$ e 5000 kHz.

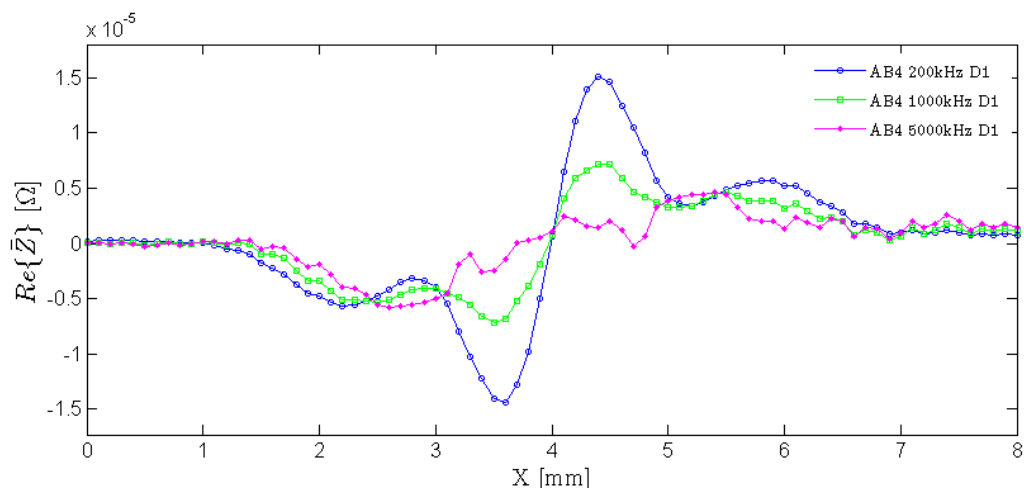


Figura 4.19 – Resultado numérico da sonda AB4 a atravessar um defeito D1 a 100 μm de profundidade @ $f = 200, 1000$ e 5000 kHz.

Apresenta-se a variação da amplitude de sinal com o aumento da profundidade do furo na Figura 4.20 e Figura 4.21. Observa-se que a sonda #12 é bastante mais eficiente na detecção desta morfologia de defeito, comparativamente à sonda AB4, e também que o aumento da profundidade do furo se traduz numa diminuição da amplitude do sinal resultante.

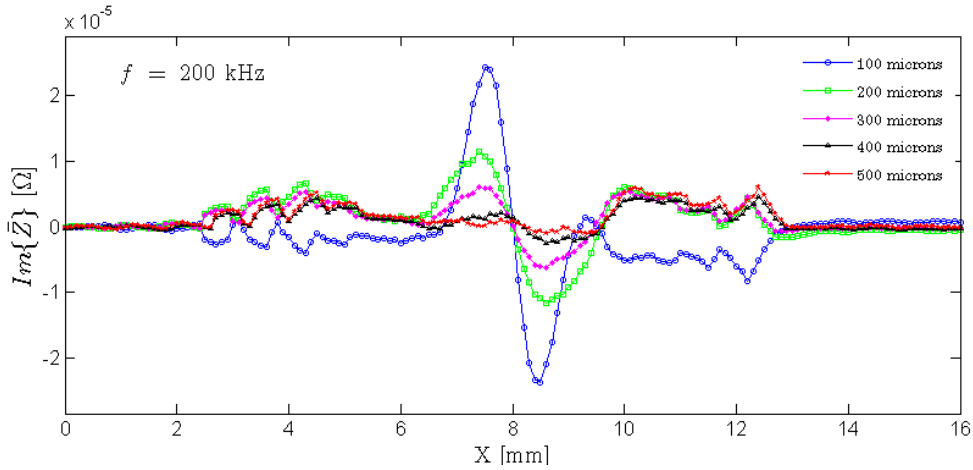


Figura 4.20- Resultado numérico da sonda #12 a atravessar um defeito D0.5 a 100, 200, 300, 400 e 500 μm de profundidade, @ $f = 200$ kHz.

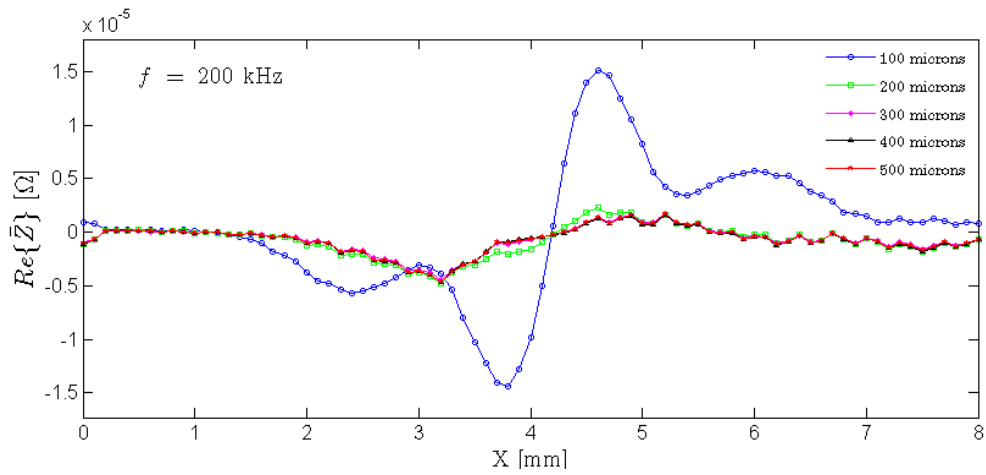


Figura 4.21 - Resultado numérico da sonda AB4 a atravessar um defeito D0.5 a 100, 200, 300, 400 e 500 μm de profundidade, @ $f = 200$ kHz.

4.5 Defeitos Paralelos à Superfície

A análise dos resultados obtidos para defeitos paralelos à superfície com as sondas AB4 e #12 permitirá perceber-se o comportamento das sondas ao atravessar de um material com um defeito paralelo à superfície, sendo neste caso o defeito representado por um volume de ar com 50 μm espessura. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.22 e Figura 4.23.

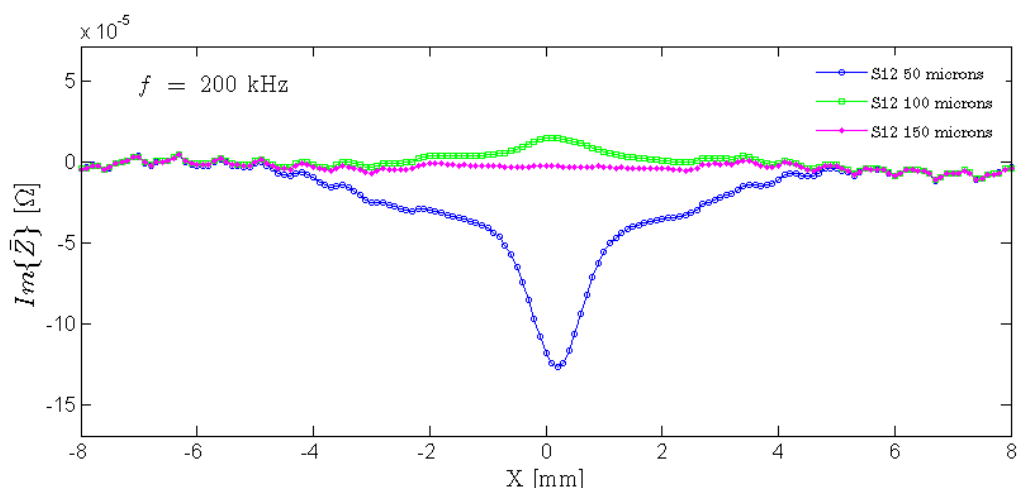


Figura 4.22 - Deslocamento da sonda #12 com o defeito paralelo a 50, 100 e 150 μm da superfície à frequência de 200 kHz.

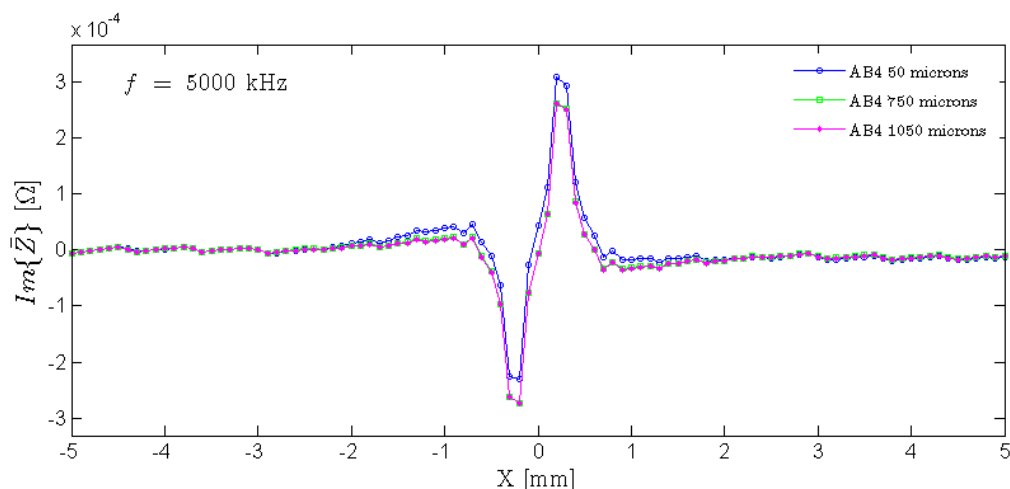


Figura 4.23 - Deslocamento da sonda AB4 com o defeito paralelo a 50, 750 e 1050 μm da superfície à frequência de 5000 kHz.

A análise destes resultados mostra que a sonda #12 tem a capacidade de detectar o defeito às distâncias de 50 e 100 μm à frequência de 200 kHz, foi este o melhor resultado obtido para este tipo de defeitos para a sonda #12. Os resultados relativos à sonda AB4 demonstram uma elevada capacidade na detecção deste tipo de defeitos, detectando facilmente defeitos a uma profundidade de 1050 μm . Como referido anteriormente, para um estudo mais pormenorizado da interface passagem material base para defeito paralelo à superfície dever-se-ia refinar a malha nessa zona e realizar-se um estudo mais aprofundado sobre os resultados obtidos.

4.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se a modelação numérica dos fenómenos electromagnéticos de duas configurações da sonda *IONic* no *software CST Studio Suite*. Esta modelação permitiu simular em 2D os campos magnéticos primários H_p e os campos vectoriais das CI num bloco de material base com dois tipos de defeitos, em profundidade e paralelo à superfície, e numa junta bimetálica

Apresentam-se os resultados obtidos mais significativos para as duas diferentes morfologias de defeito, percebeu-se qual a capacidade teórica da sonda *IONic* em detectar defeitos que se encontrem paralelos à superfície, qual a profundidade máxima a que se consegue detectar um defeito artificial em profundidade e qual a influência do diâmetro dos defeitos nos resultados numéricos, perceber o comportamento da sonda numa inspecção onde as características do material se alteram durante a inspecção.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

O trabalho desenvolvido neste capítulo teve por objectivo apresentar os resultados obtidos através dos ensaios experimentais nas diferentes morfologias de defeito e nos diferentes materiais utilizados. Os ensaios foram realizados para as sondas convencionais comparativamente com as sondas *IOnic*. Neste capítulo é ainda apresentado o comportamento das sondas de CI na avaliação de uma junta bimetálica.

Apresenta-se neste capítulo a síntese dos resultados mais relevantes da avaliação e caracterização do comportamento das sondas *Pencil Probe* e *IOnic* nas inspecções realizadas às juntas bimetálicas e na detecção das duas morfologias de defeito nos materiais em estudo.

No fim do capítulo apresentam-se os resultados relativos às inspecções realizadas numa liga AlMgSc, utilizada na produção de componentes estruturais na indústria aeroespacial e a comparação dos resultados obtidos com a *Pencil Probe* e sondas *IOnic*.

5.2 Resultados Experimentais em Juntas Bimetálicas

5.2.1 Sonda Convencional (*Pencil Probe*)

Os resultados da inspeção de juntas bimetálicas, para a sonda *Pencil Probe* estão representados na Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3. Nestas figuras encontram-se os gráficos do sinal das sondas nas juntas Al – Cu – Al, Al – Aço – Al e Aço - Cu - Aço respectivamente, para as frequências avaliadas.

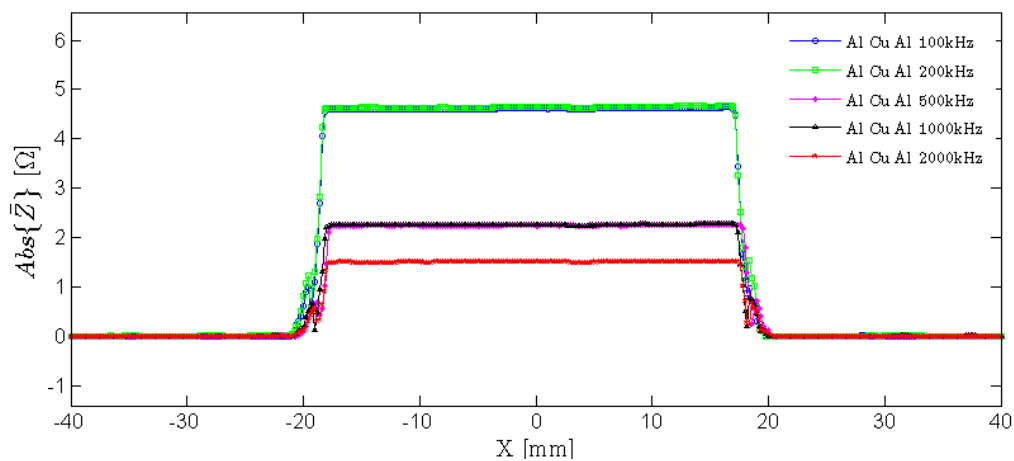


Figura 5.1 – Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre a junta Al – Cu – Al, @ 100, 200, 500, 1000 e 2000 kHz.

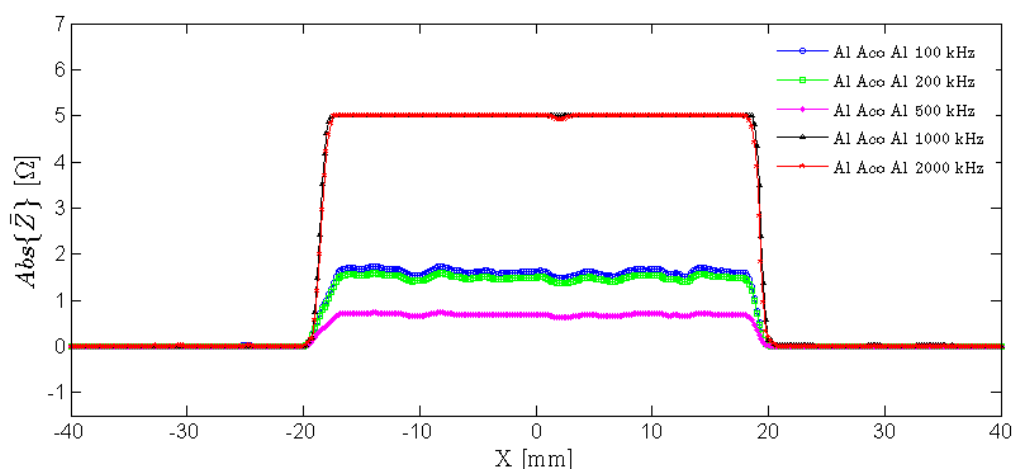


Figura 5.2 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre a junta Al – Aço – Al, @ 100, 200, 500, 1000 e 2000 kHz.

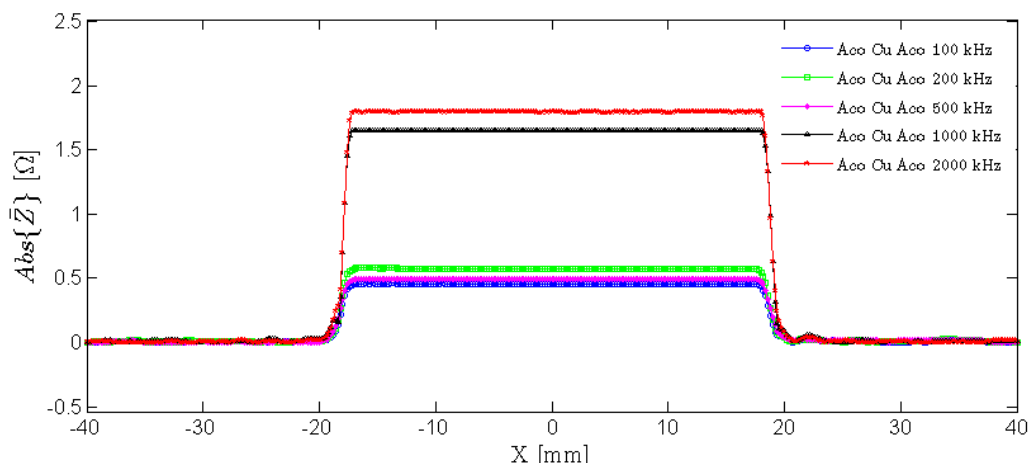


Figura 5.3 – Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre a junta Aço – Cu – Aço, @ 100, 200, 500, 1000 e 2000 kHz.

Tendo em conta os gráficos apresentados, pode observar-se, que a sonda *Pencil Probe* detectou todas as configurações de juntas bimetálicas com sucesso, em toda a gama de frequências avaliadas, o valor de $Abs(\vec{Z})$ no início de cada ensaio é sempre nulo (devido à calibração do equipamento antes do início da inspecção), quando a sonda passa para o material central do provete, o sinal aumenta, voltando a ser nulo quando esta se encontra de novo no mesmo material onde se iniciou o ensaio.

Pode concluir-se que pelo padrão de variação do sinal da sonda ao atravessar uma junta bimetálica não é possível estabelecer um modelo geral que permita identificar quais os materiais que foram inspeccionados, já que a variação do sinal depende do ponto do material em que se fez a calibração.

5.2.2 Sondas *IONic*

Observa-se no gráfico da Figura 5.4 a variação da amplitude do sinal da sonda #14, com o aumento da frequência. O comportamento de sinal mantém-se e apresenta um aumento da amplitude directamente proporcional ao aumento da frequência de inspecção.

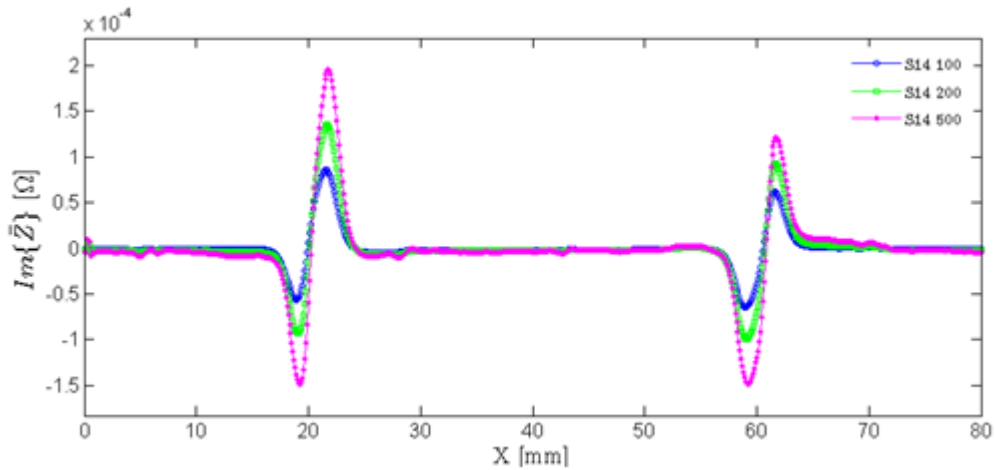


Figura 5.4 - Avaliação da amplitude de sinal na junta Al – Cu – Al, com a sonda *IOnic* #14 @ 100, 200 e 500 kHz.

O sinal das sondas #12, #11 e #2, à frequência de 500 kHz no conjunto Al – Cu - Al (Figura 5.5), apresenta o sinal característico indicador de um defeito, não sendo a amplitude máxima e mínima igual em módulo, como no sinal característico da sonda na presença de um defeito, este facto deve-se às diferentes características físicas dos materiais da junta.

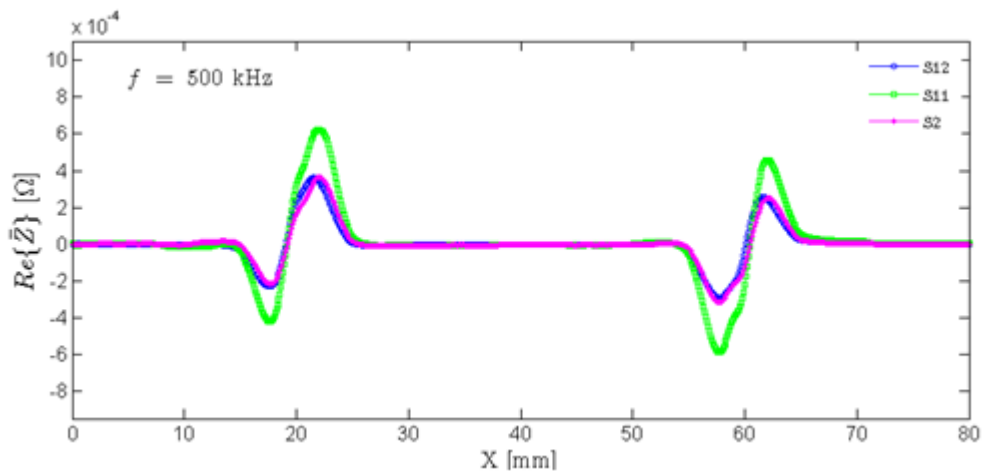


Figura 5.5 - Avaliação da amplitude de sinal na junta Al – Cu – Al, com as sondas *IOnic* #12, #11 e #2 @ 500 kHz.

Na Figura 5.6 e Figura 5.7, apresenta-se o comportamento das sondas *IOnic* nas inspeções realizadas às juntas Aço – Cu – Aço e Al – Aço – Al respectivamente, assim como a representação da junta e posição geométrica da sonda nos pontos máximos e mínimos do valor $Re(\vec{Z})$.

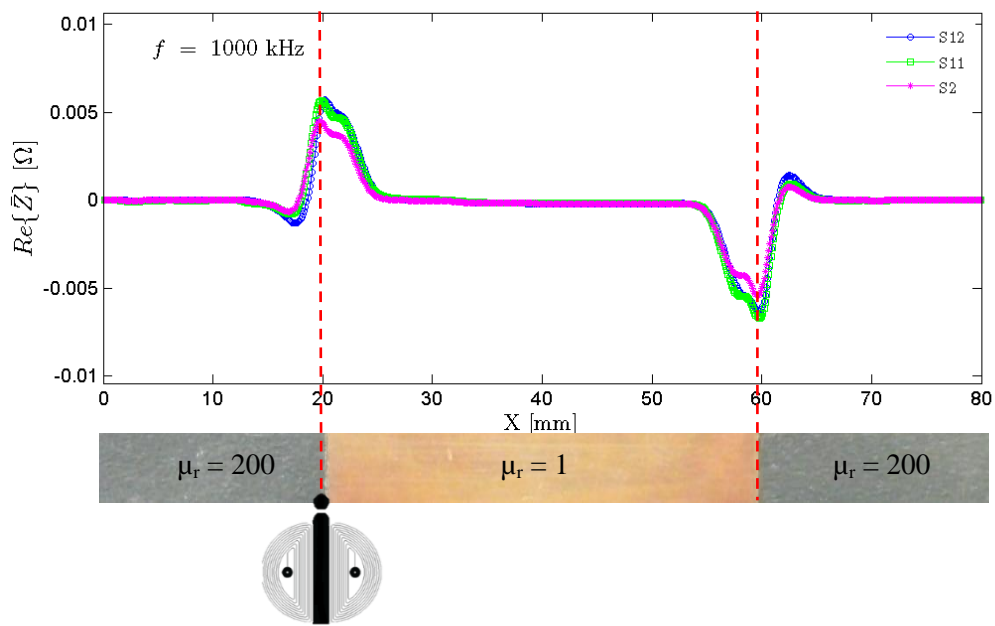


Figura 5.6 - Esquema ilustrativo da inspeção da junta Aço – Cu – Aço e respectivo sinal da sonda #12, #11 e #2 @ 1000 kHz.

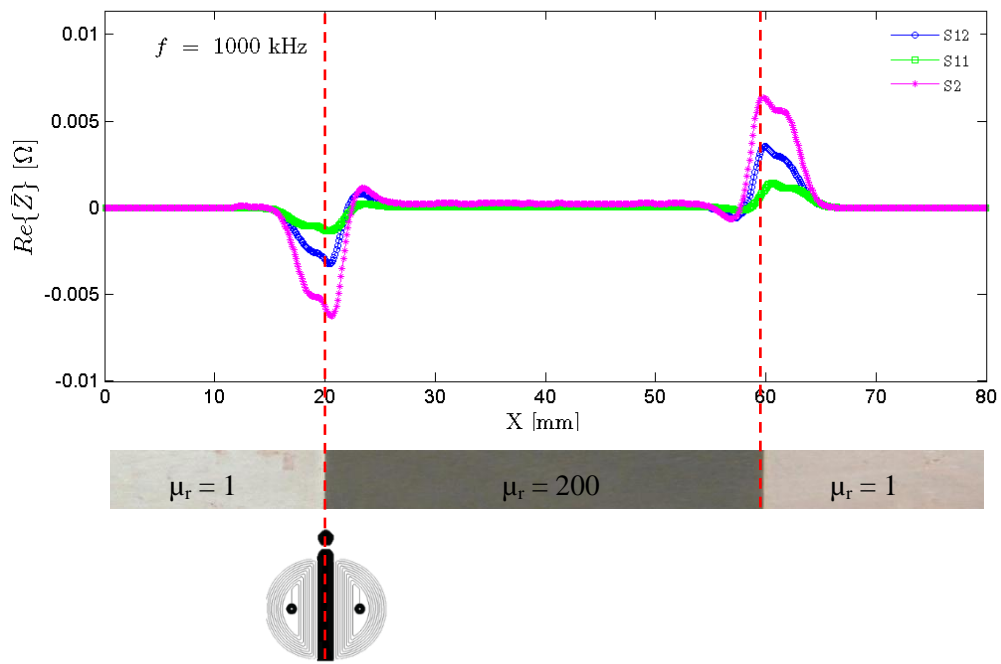


Figura 5.7 – Esquema ilustrativo da inspeção da junta Al – Aço – Al e respectivo sinal da sonda #12, #11 e #2 @ 1000 kHz.

Contrariamente aos resultados da sonda *Pencil Probe*, a sonda IONic apresenta sempre o mesmo padrão de sinal que permite identificar qual o material com maior e menor permeabilidade (μ). Ao atravessar de um material para outro a sonda apresentou uma curva característica, que permite

perceber a transição da sonda para um material diferente. Verificou-se que, a sonda ao atravessar de um material de elevada permeabilidade relativa para outro de menor valor, apresentou uma variação negativa no valor $Re(\vec{Z})$ e no caso contrário, onde o valor da permeabilidade relativa diminui do primeiro para o segundo material o valor $Re(\vec{Z})$ apresentou uma variação positiva.

A comparação entre as três combinações de juntas bimetálicas avaliadas com a sonda AB4 apresenta-se na Figura 5.8, observar-se a curva característica referida no parágrafo anterior, na inspecção da junta Al – Cu – Al o sinal obtido representa apenas a presença da descontinuidade entre os blocos da junta, já que as permeabilidades relativas do alumínio e do cobre são idênticas.

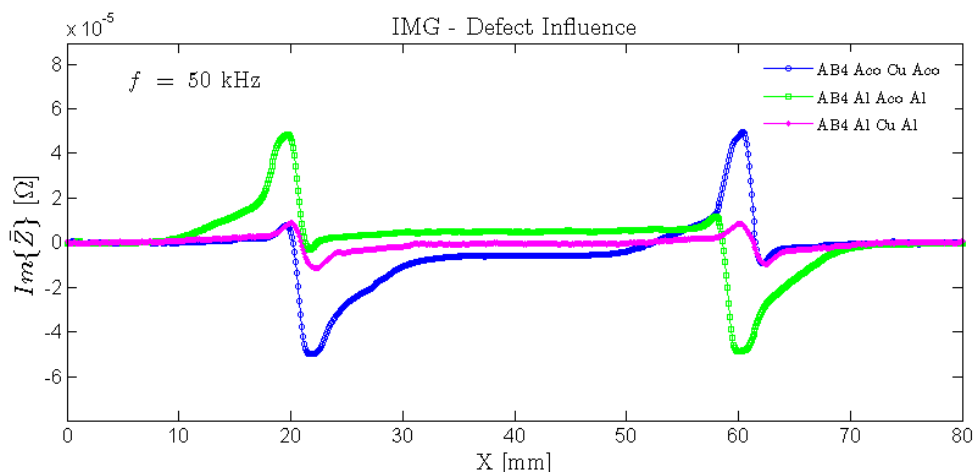


Figura 5.8 - Comparação do sinal da sonda *IONic* AB4 para as juntas Aço – Cu – Aço, Al – Aço – Al e Al – Cu – Al @ 50 kHz.

5.3 Resultados Experimentais em Defeitos em Profundidade

5.3.1 Efeito do Diâmetro do Furo

A avaliação da influência do diâmetro do furo no sinal da sonda, serviu para determinar o diâmetro de furo a executar nos restantes provetes. Desta avaliação percebe-se, como esperado que a amplitude de sinal aumenta proporcionalmente ao aumento do diâmetro do furo.

Os gráficos da Figura 5.9 e Figura 5.10 ilustram a variação do sinal resultante da variação do diâmetro de furo, nas linhas L6, L7 e L8 (\varnothing 0.5, 1 e 2 mm), com a sonda *Pencil Probe* e *IONic* respectivamente. Ambas as configurações de sonda detectaram os 3 diâmetros de furo. Assim, por uma questão de facilidade de execução optou-se por produzir os provetes com 1 mm de diâmetro.

De notar que se as condições laboratoriais permitissem, os furos seriam todos feitos com um diâmetro de 0.5 mm.

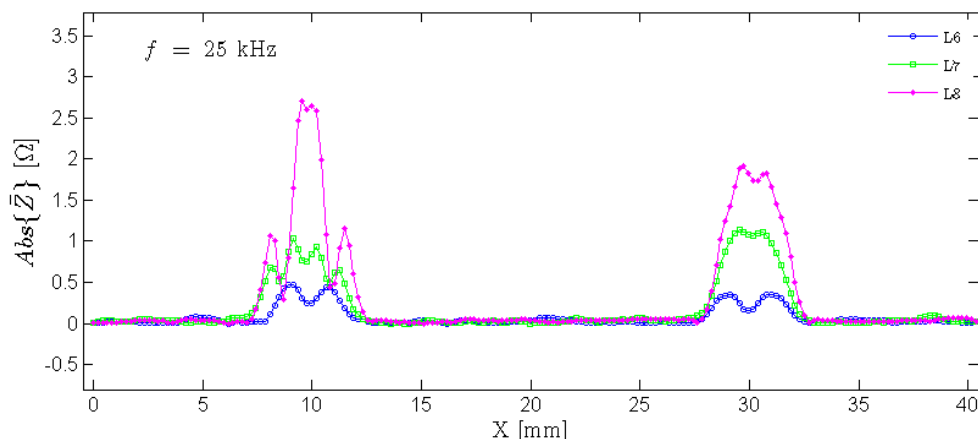


Figura 5.9 – Comparação do sinal da sonda *Pencil Probe* com o aumento do diâmetro de furo na chapa 1, linha 6, 7 e 8, furo de 100 e 200 μm @ 25 kHz.

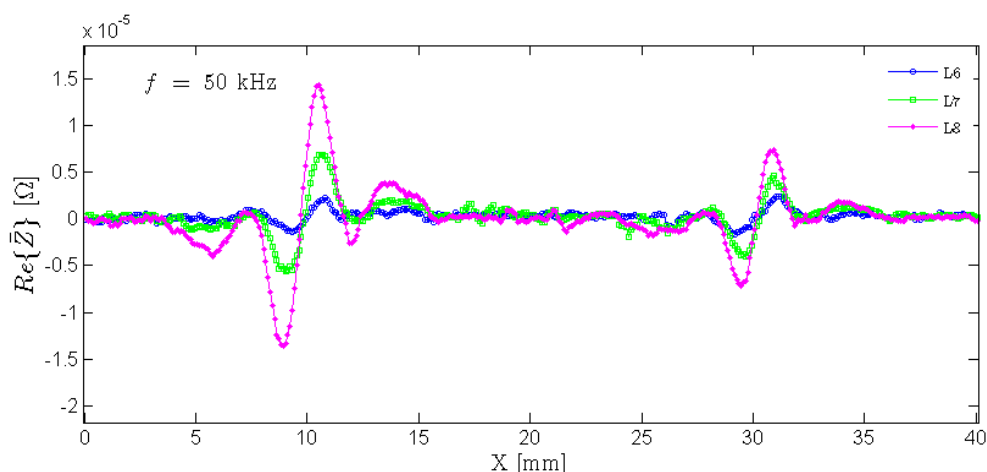


Figura 5.10 - Comparação do sinal da sonda *IONic* #12 com o aumento do diâmetro de furo na chapa 1, linha 6, 7 e 8, furo de 100 e 200 μm @ 50 kHz.

Os defeitos criados nos provetes foram avaliados em inspecções de topo, que como demonstradas na Figura 3.4 b) são caracterizadas por fazer a sonda passar na superfície da chapa onde se encontram os orifícios dos furos, para determinar a capacidade das sondas em detectar as diferenças de altura e diâmetro de furos. Os gráficos comparativos do sinal das sondas *Pencil Probe* e *IONic* (Figura 5.11 e Figura 5.12), as sondas mostram-se eficazes a diferenciar os diferentes diâmetros de furos, apresentando um aumento de sinal com o aumento do diâmetro do furo.

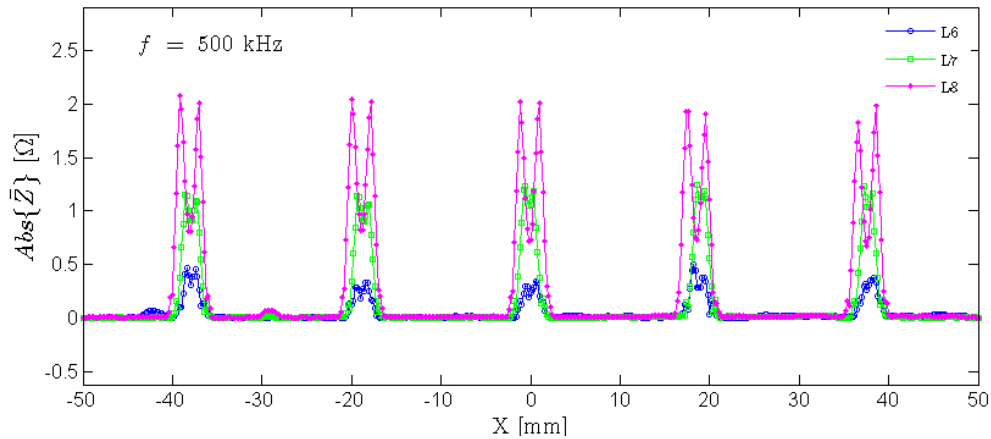


Figura 5.11 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 500$ kHz.

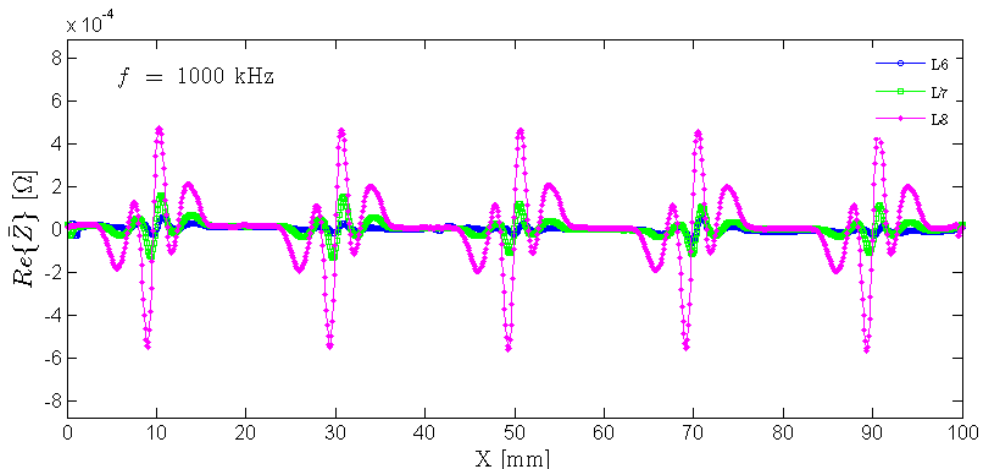


Figura 5.12 - Resultado experimental da Sonda #2 na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 1000$ kHz.

5.3.2 Efeito do *Offset* de Furo no Sinal da Sonda

Na Figura 5.13 representa-se o resultado dos ensaios que permite avaliar a variação da intensidade do sinal da sonda *IONIC* com o afastamento do furo. Os sinais das sondas foram sobrepostos com a respectiva geometria das bobinas sensíveis espirais planas na mesma escala. Estes resultados permitem confirmar que o sinal da sonda é alterado quando a espira exterior das bobinas sensíveis se encontra a cerca de 5 mm do defeito cilíndrico e que o sinal característico da sonda se mantém, apenas a amplitude diminui à medida que o furo se afasta do centro da sonda.

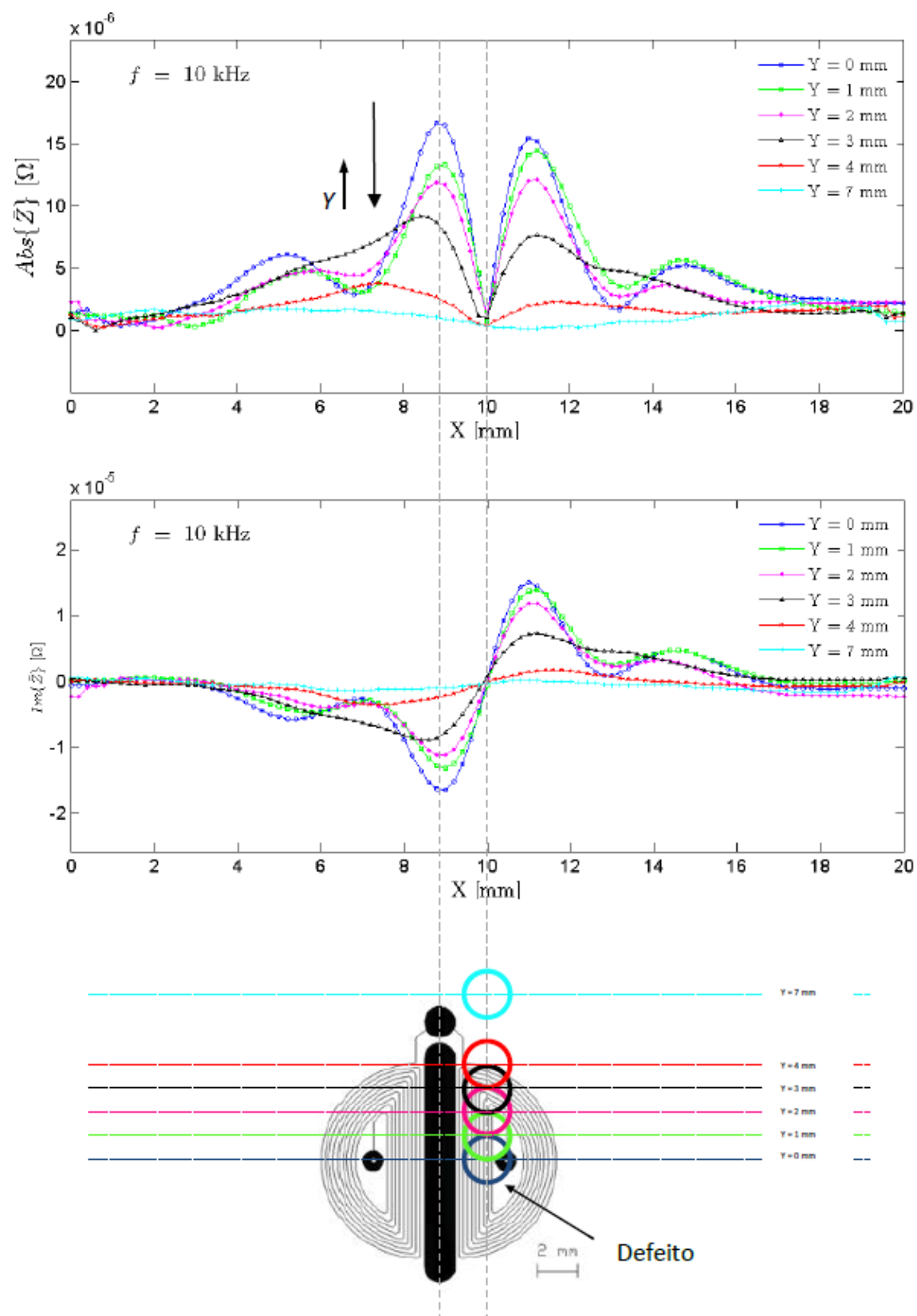


Figura 5.13 – Esquema da variação do sinal da sonda *Ionic* com o *offset* dos furos.

Estes ensaios que permitiram avaliar a variação da intensidade do sinal da sonda *IONic* foram realizados em um furo a encontra a 100 μm da superfície de inspecção a uma frequência de 10 kHz, deslocando a sonda sobre o defeito circular. Foram realizados vários varrimentos com diferentes *offsets* entre o centro da sonda e o centro do defeito circular, como ilustra a Figura 5.13. O padrão de sinal corresponde ao padrão tipo sinusóide, característico dos ensaios anteriores. Nesta condição de ensaio o maior desequilíbrio de condutividade ocorre quando o furo se encontra sensivelmente a meio da bobina sensível, isto deve-se ao facto das correntes mais intensas se encontrarem perto do filamento de excitação e as expiras das bobinas sensíveis mais perto do filamento serem as mais solicitadas. Verifica-se que a sonda é muito sensível até um *offset* de $Y = 3\text{ mm}$. Verifica-se ainda que o sinal da sonda praticamente não é alterado quando esta se desloca com um *offset* de $Y = 4\text{ mm}$ ou $Y = 7\text{ mm}$ relativamente ao centro do defeito. Foram realizados os mesmos ensaios para a sonda convencional, os resultados são apresentados na Figura 5.14.

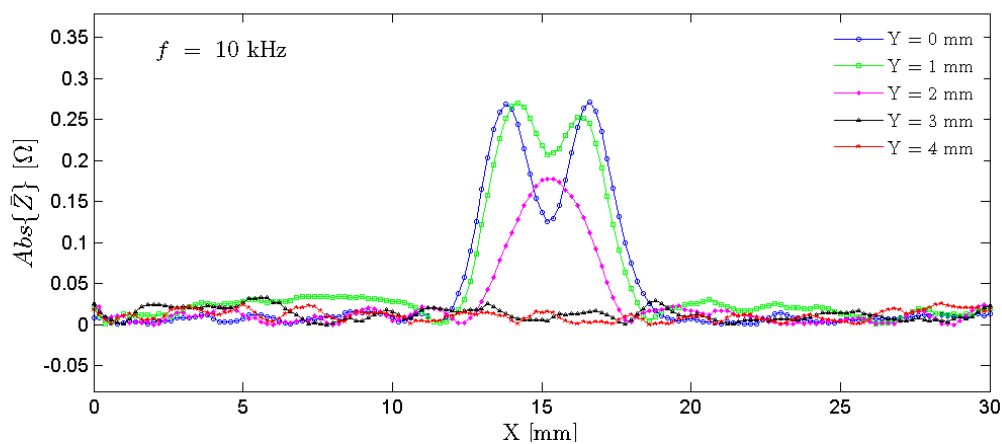


Figura 5.14 - Comparação do sinal da *Pencil Probe* com o aumento do *offset* dos furos.

A análise gráfica permite perceber que a sonda convencional é muito mais afectada pelo *offset* do defeito do que a sonda *IONic*. Isto constitui uma vantagem considerável tendo em conta que as sondas podem não passar exactamente pelo centro dos furos, ou no caso de uma inspecção em condições reais, nem sempre se sabe a localização dos defeitos.

5.3.3 Inspeções de Topo

A Figura 5.15 e a Figura 5.16 permitem concluir a incapacidade das sondas *IONic* e *Pencil Probe* na diferenciação das profundidades de furo existentes nos provetes em inspeções de topo (Figura 3.4). Apesar da detecção com sucesso de todos os furos a amplitude do sinal não apresenta variações indicadoras de diferenças na profundidade dos furos. Assim sendo apresentam-se apenas os resultados experimentais relativos aos defeitos padrão da chapa 5 (cobre) para a sonda *Pencil Probe* e chapa 3 (Al 6061-T6) para a sonda *IONic* #13, todos os resultados referentes aos restantes provetes apresentaram resultados semelhantes, não sendo por essa razão apresentados. Assim sendo os resultados mais importantes para a avaliação desta morfologia de defeitos, são os de inspeção de base.

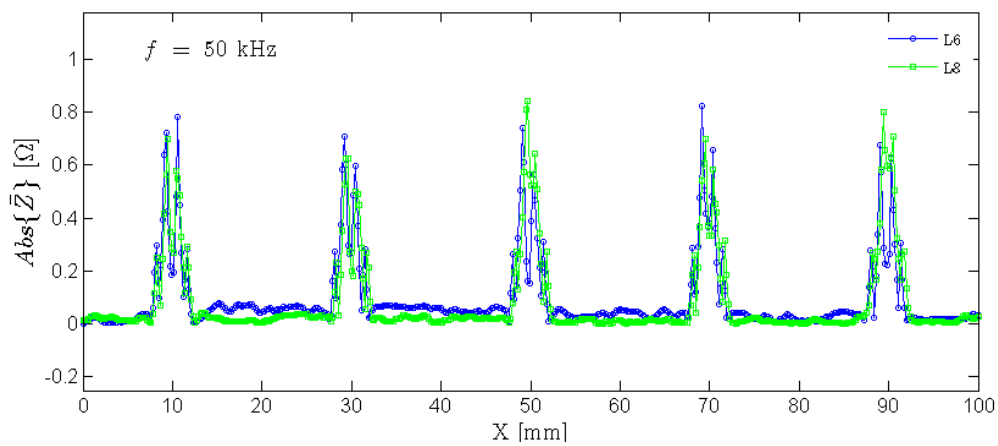


Figura 5.15 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 e 8 @ $f = 50$ kHz.

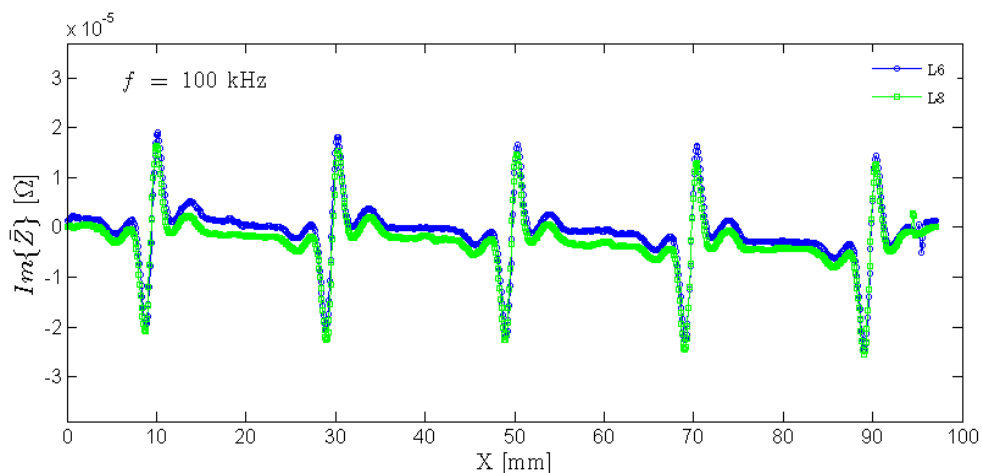


Figura 5.16 - Resultado experimental da Sonda #13 na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 e 8 @ $f = 100$ kHz.

5.3.4 Inspeções de Base com a Sonda *Pencil Probe*

5.3.4.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

Na Figura 5.17 e Figura 5.18 apresenta-se o sinal da sonda *Pencil Probe*, nas inspeções realizadas na chapa 1, linha 6 (furos com $\varnothing = 0.5$ mm). Percebe-se claramente que a sonda tem a capacidade de detectar defeitos que se encontrem até 400 μm da superfície de inspecção, com o sinal da sonda a decrescer à medida que a distancia entre a superfície do material e o furo aumenta. Do aumento da frequência de inspecção, entre os 100 e os 1000 kHz a alteração do sinal não é significativa, aumentando a amplitude do sinal, mas a capacidade de detecção não se altera, apenas o defeito a 100 μm é detectado.

Com o aumento da profundidade os furos deixam gradualmente de ser detectados, devido à acumulação das correntes à superfície do provete, profundidade máxima detectada neste caso foram 400 μm para as frequências de 25 e 50 kHz nas frequências mais elevadas são detectados os defeitos de 100 e 200 μm .

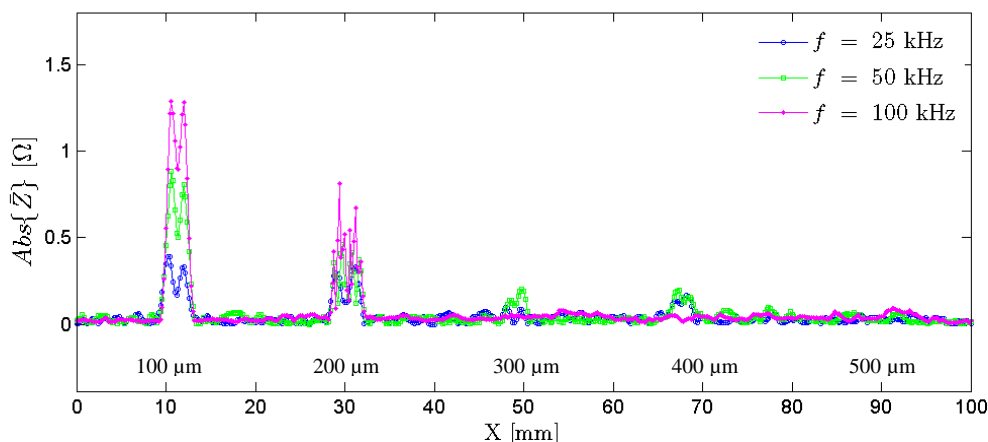


Figura 5.17 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 25, 50$ e 100 kHz.

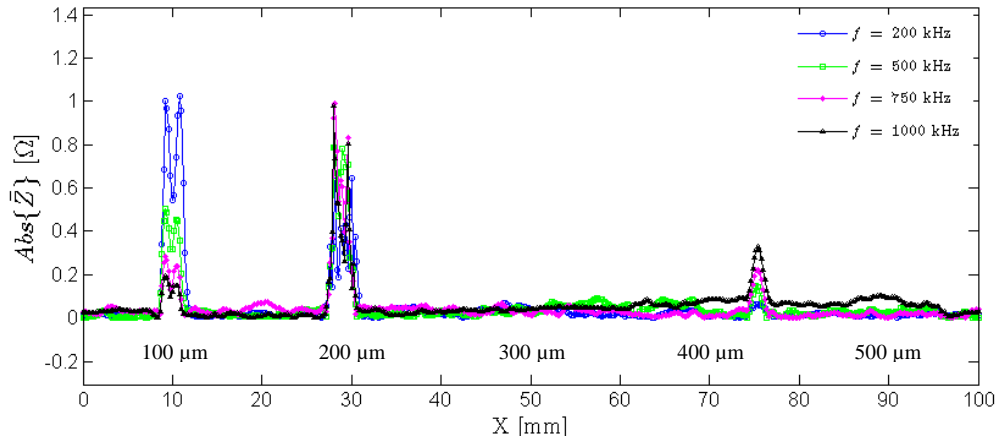


Figura 5.18 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 200, 500, 750$ e 1000 kHz.

A variação do sinal da sonda quando esta passa por defeitos com diâmetros de 1 e 2 mm, é avaliada na Figura 5.19 e Figura 5.20. Uma vez mais percebe-se que a sonda a baixas frequências tem a capacidade de detectar defeitos mais afastados da superfície de inspeção. Com o aumento do diâmetro dos furos de 0.5 para 1 mm, para uma mesma frequência, a sonda tem a capacidade de detectar defeitos até 500 μm de profundidade em contraste com os 400 μm da linha 6, conclusão que também se retira da avaliação do sinal da sonda para a linha 8. Para frequências acima dos 100 kHz apenas os defeitos de 100 μm são detectados.

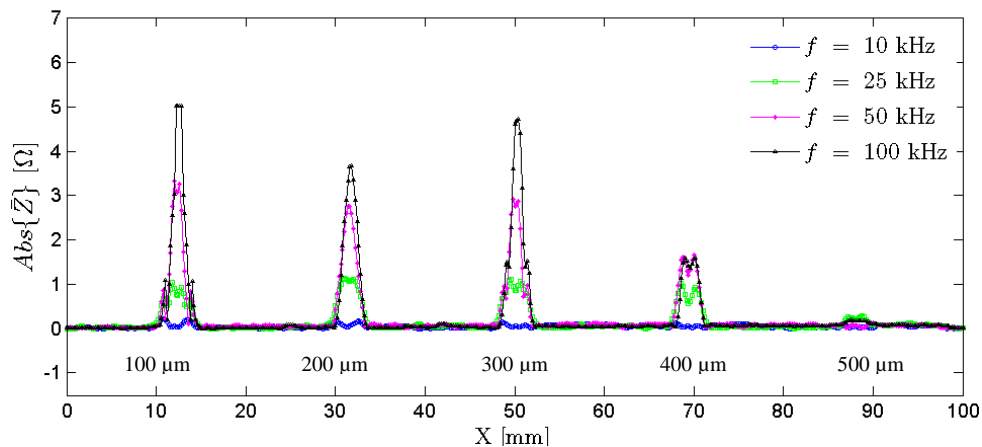


Figura 5.19 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.

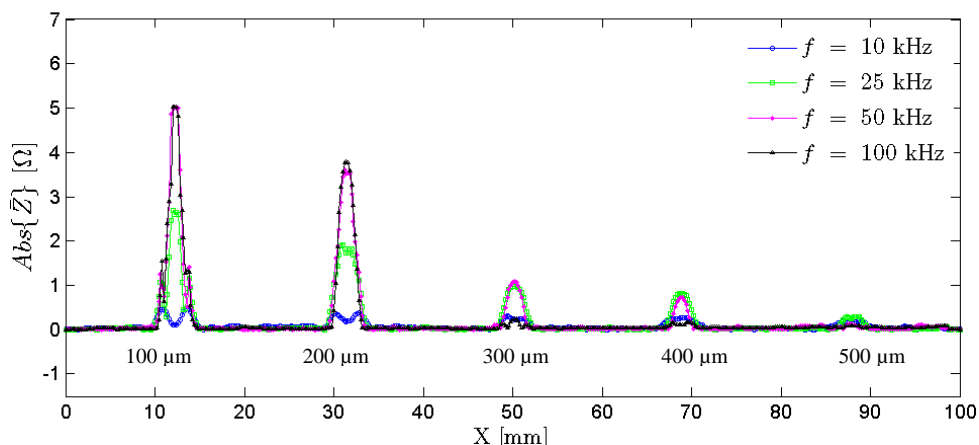


Figura 5.20 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.

5.3.4.2 Resultados na Chapa 2 (Al 5083-H12)

Da inspeção da chapa 2 detectou-se com sucesso os furos até $500 \mu\text{m}$ (Figura 5.21) nas frequências de $10, 25$ e 50 kHz. e $400 \mu\text{m}$ para os 100 kHz. À frequência de 500 kHz já não permite distinguir qualquer sinal da presença do furo.

O gráfico da Figura 5.22 permite perceber que a avaliação de um defeito a uma profundidade superior a $500 \mu\text{m}$ (linha 7), não apresentaram nenhum sinal óbvio da presença de furos.

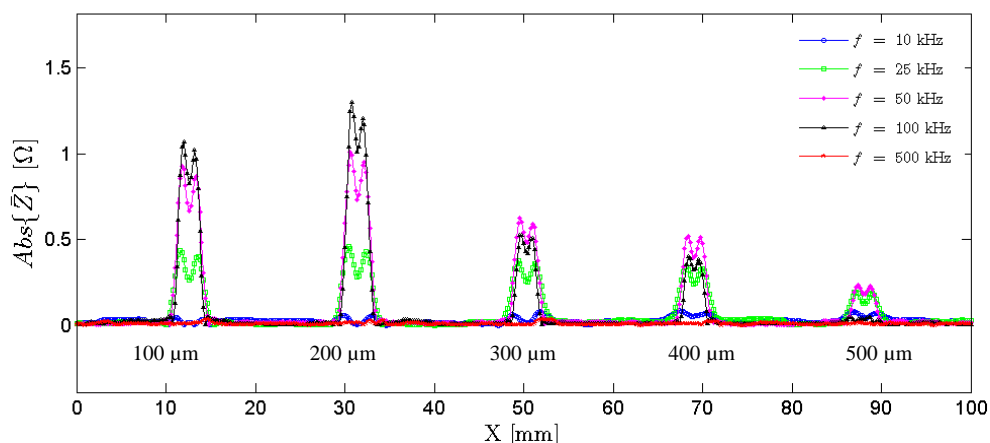


Figura 5.21 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 10, 25, 50, 100$ e 500 kHz.

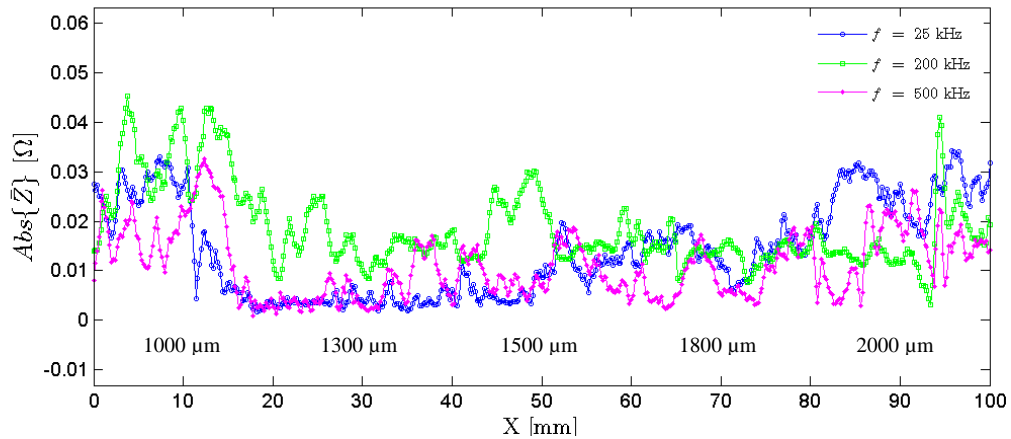


Figura 5.22 – Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 25, 200$ e 500 kHz.

5.3.4.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

Nas inspeções realizadas na chapa 3 o sinal da sonda *Pencil Probe* (Figura 5.23) indicou a presença de furos a uma profundidade máxima de $300\ \mu\text{m}$ às frequências de 25 e 50 kHz, valor que diminui para $200\ \mu\text{m}$ para a frequência de 100 kHz. A frequência de 500 kHz não apresenta qualquer perturbação no sinal representante da presença dos furos. Apenas se apresentam os resultados referentes a linha 6, uma vez que os defeitos a profundidades superiores a $300\ \mu\text{m}$ não foram detectados.

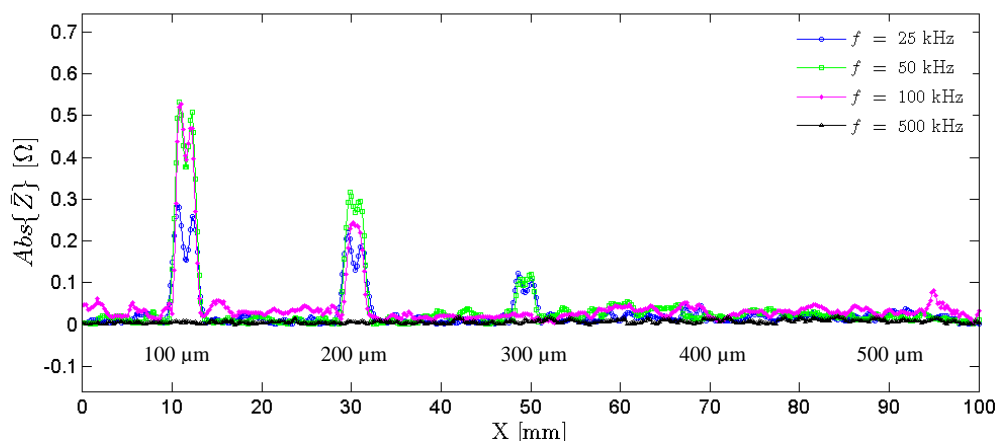


Figura 5.23 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 25, 50, 100$ e 500 kHz.

5.3.4.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

A Figura 5.24 apresenta o gráfico do sinal da sonda *Pencil Probe*, este resultado permite concluir que não existe qualquer perturbação do sinal representativa da existência dos furos, apenas ruído proveniente da superfície irregular do provete e dos dispositivos electrónicos.

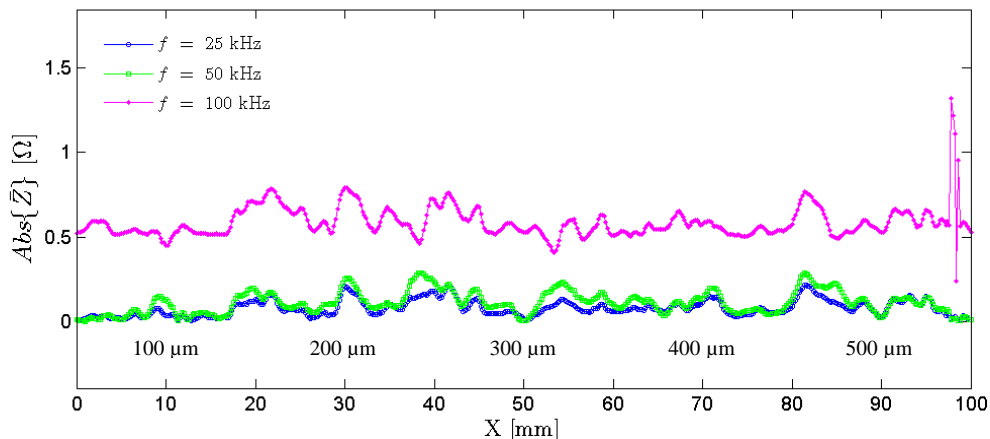


Figura 5.24 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 25, 50$ e 100 kHz.

5.3.4.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

O gráfico apresentado na Figura 5.25, referentes à inspecção com a sonda *Pencil Probe* na chapa 5 mostram a existência do furo a $100 \mu\text{m}$ nas frequências de 25 e 50 kHz, acima destas frequências não é detectado qualquer furo.

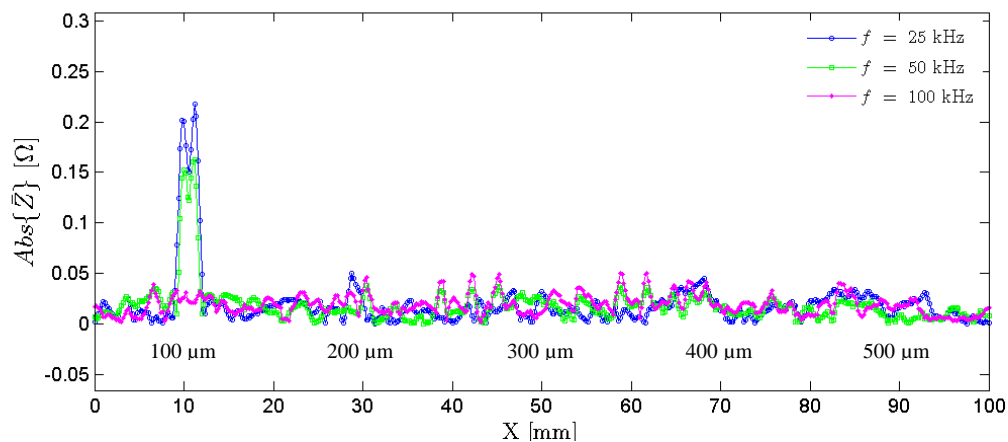


Figura 5.25 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 25, 50$ e 100 kHz.

5.3.4.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.26 e Figura 5.27 distingue-se a curva representativa do furo que se encontra imediatamente abaixo da primeira lamina de alumínio, nas frequências de 25, 50 e 100 kHz, não sendo o sinal tão fácil de observar como nos casos anteriores devido ao ruído existente, principalmente no gráfico da frequência mais elevada.

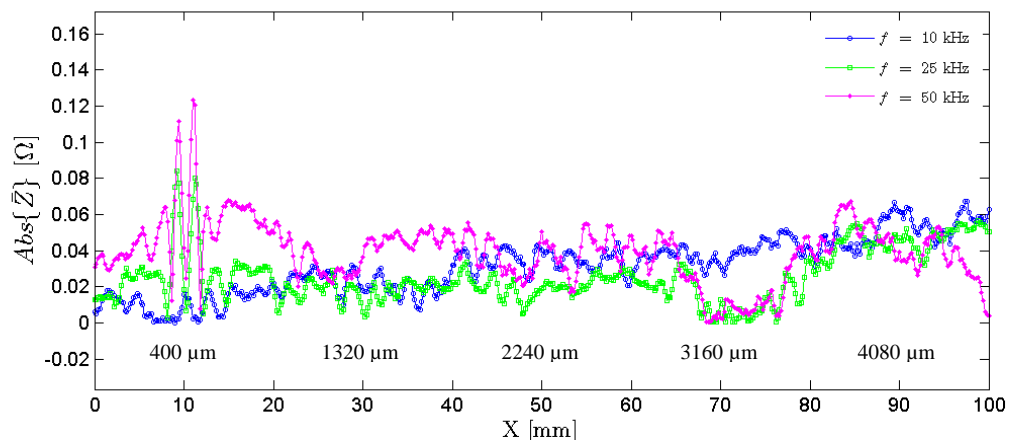


Figura 5.26 – Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.

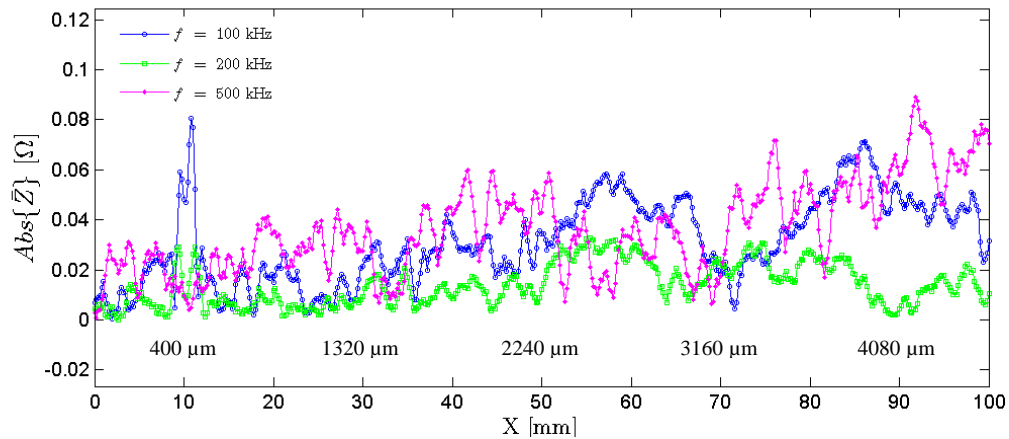


Figura 5.27 – Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 100, 200$ e 500 kHz.

5.3.4.7 Resultados na Chapa 7 (AISI 304)

O gráfico apresentado na Figura 5.28 mostra a incapacidade das sondas *Pencil Probe* na detecção de qualquer um dos furos existentes no provete de aço. Para frequências mais elevadas, os resultados são idênticos.

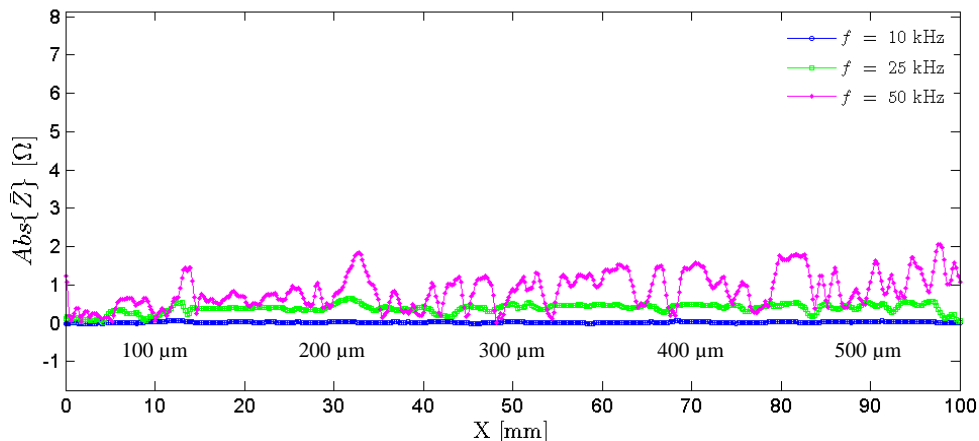


Figura 5.28 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.

5.3.4.8 Resultados na Chapa 8 (GG 25)

O sinal do gráfico apresentado na Figura 5.29 para a frequência de 10 kHz mostra a presença dos furos a 100 , 200 e 300 μm e uma perturbação do sinal da mesma ordem de grandeza do ruído, em $X = 70$ e $X = 90$ devida possivelmente a presença dos furos de 400 e 500 μm . As frequências de 25 e 50 kHz são constituídas apenas pelo ruído, não existe qualquer evidência da presença dos furos.

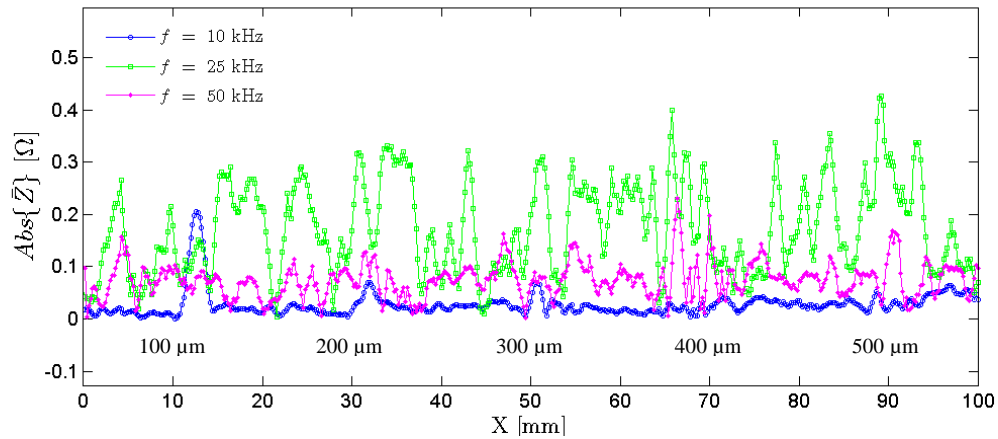


Figura 5.29 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 8, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.

5.3.4.9 Resultados na Chapa 9 (Grafite IC5)

Contrariamente às análises anteriores em que as frequências mais baixas apresentavam melhores resultados na detecção dos furos, os resultados experimentais apresentados na Figura 5.30 e Figura 5.31 revelam a capacidade das sondas em detectar todos os furos da linha 6 no provete de grafite às frequências, entre 100 e 1200 kHz, nas frequências de 10, 25 e 50 kHz não se detectou qualquer indício da presença dos furos.

Das inspecções realizadas na linha 7 e 8, o sinal das sondas não indicou a presença dos furos localizados entre os 1000 e 3000 μm .

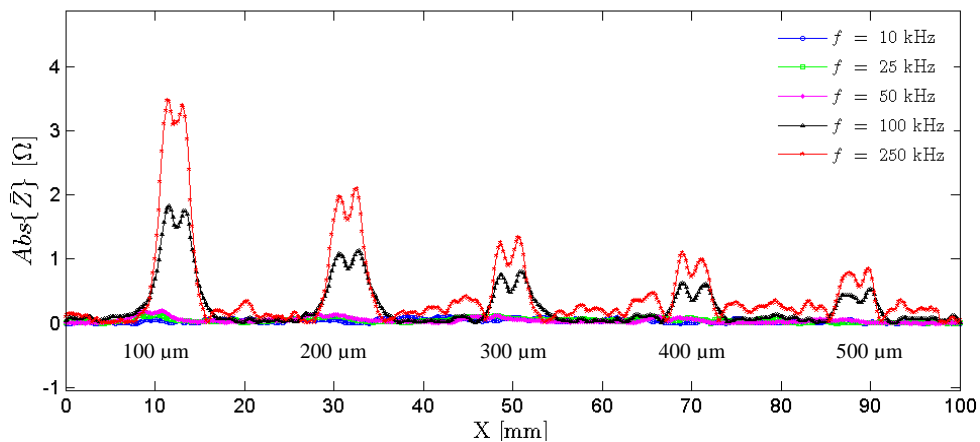


Figura 5.30 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25$ e $50, 100$ e 250 kHz.

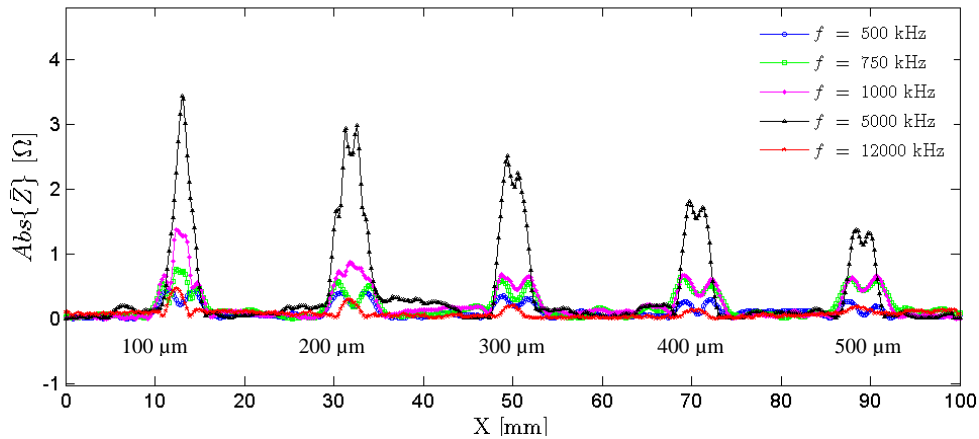


Figura 5.31 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 500, 750, 1000, 5000$ e 12000 kHz.

5.3.5 Resultados das Inspeções de Base com a Sonda #2

5.3.5.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

No gráfico relativo à linha 6, Figura 5.32, observa-se um sinal de grande amplitude em $X = 30$ mm, provavelmente devido a uma execução deficiente do furo, a detecção tão significativa dessa imperfeição impossibilita a percepção da presença dos restantes defeitos da linha.

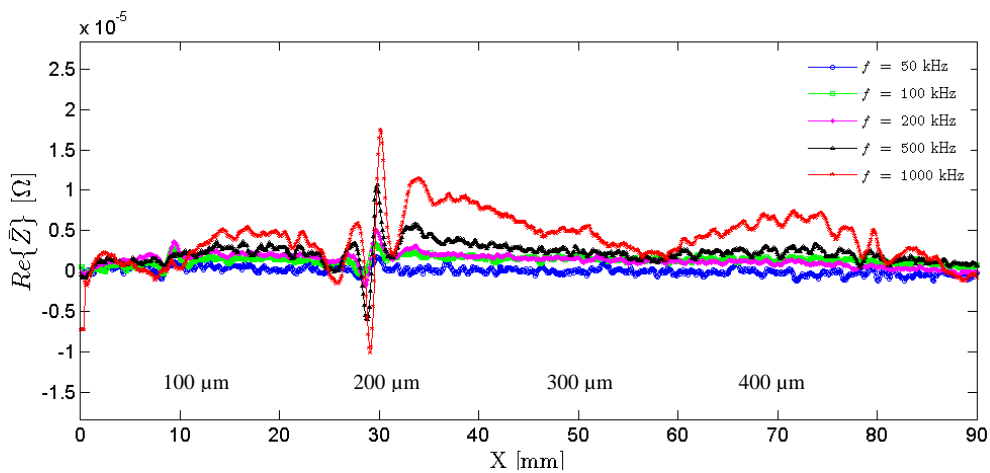


Figura 5.32 - Resultado experimental da Sonda IONIC #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 100, 200, 500$ e 1000 kHz.

Na Figura 5.33 e Figura 5.34, estão ilustrados os resultados dos ensaios realizados na linha 7 e 8, não se apresentando os resultados coerentes com os obtidos nas inspecções com a sonda *Pencil Probe* e simulações numéricas, onde se verificou anteriormente que ao aumento do diâmetro do furo corresponde um aumento da eficácia na detecção de defeitos. Neste caso, os resultados referentes à linha 7 permitem detectar o furo localizado a 400 μm de profundidade e na linha 8 apenas se observa a presença do furo localizado a 300 μm da superfície.

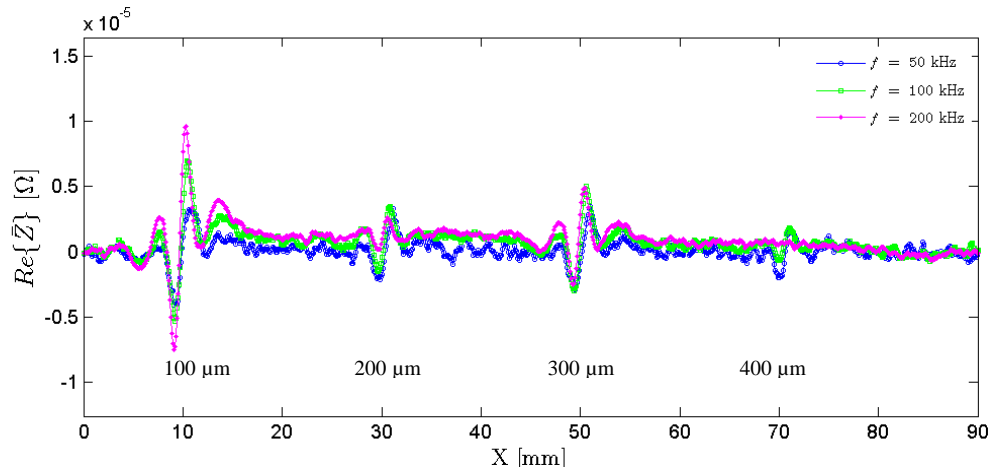


Figura 5.33 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

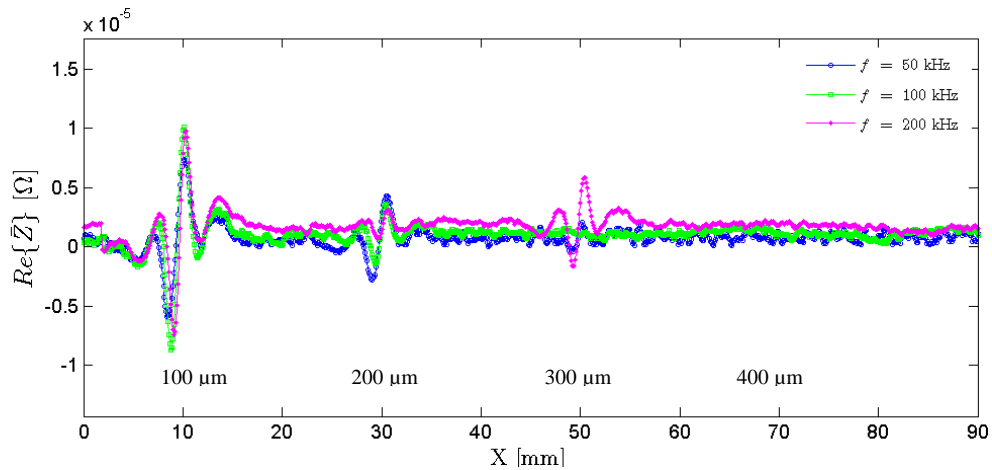


Figura 5.34 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

5.3.5.2 Resultados na Chapa 2 (Al 5083-H12)

Na Figura 5.35 apresenta-se a componente $Re(\vec{Z})$ dos resultados da inspecção da chapa 2, observa-se a detecção dos defeitos até à profundidade de 400 μm nas frequências de 50, 100 e 200 kHz, profundidade que diminui para 200 μm a 500 kHz.

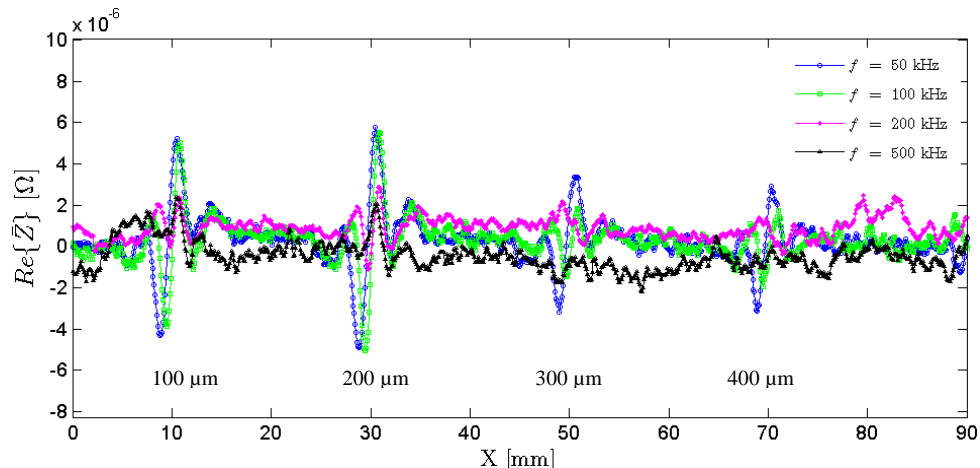


Figura 5.35 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100, 200$ e 500 kHz .

5.3.5.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

O resultado da inspecção à chapa 3 apresenta-se na Figura 5.36. Observa-se a presença dos furos a 100 e 200 μm da superfície, neste caso apenas a frequência de 50 kHz possibilitou a detecção dos defeitos.

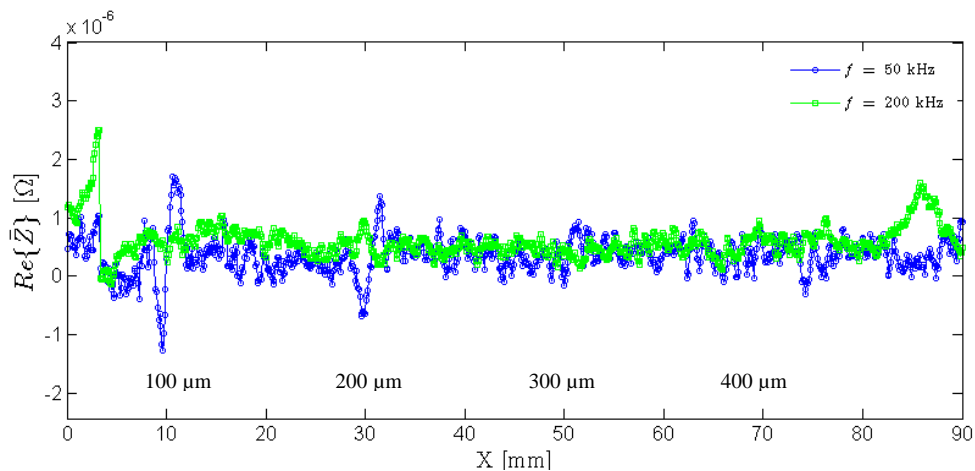


Figura 5.36 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50$ e 100 kHz .

5.3.5.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

A sonda *IONic* #2 às frequências ensaiadas não detectou a presença de nenhum defeito na chapa 4, como se observa na Figura 5.37.

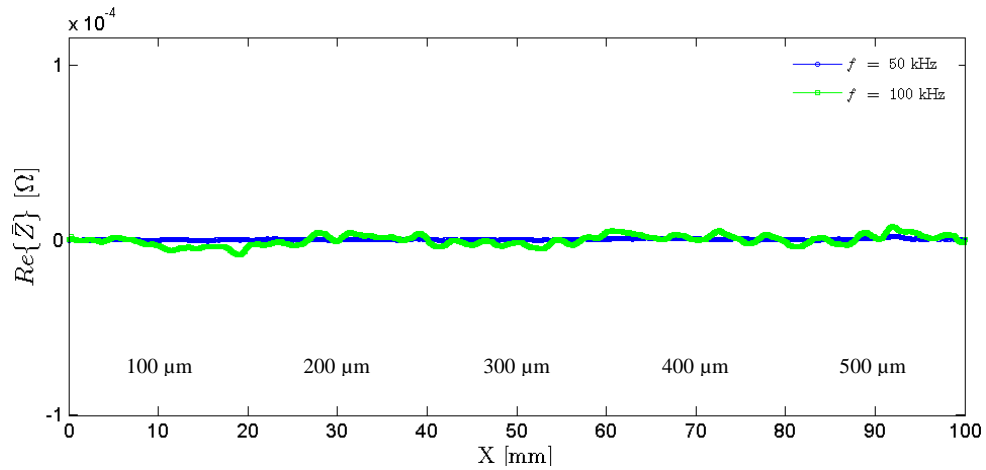


Figura 5.37 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$, e 100 kHz.

5.3.5.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

Verifica-se na Figura 5.38, que a sonda *IONic* #2 não se mostrou eficaz na detecção de defeitos a qualquer das profundidades.

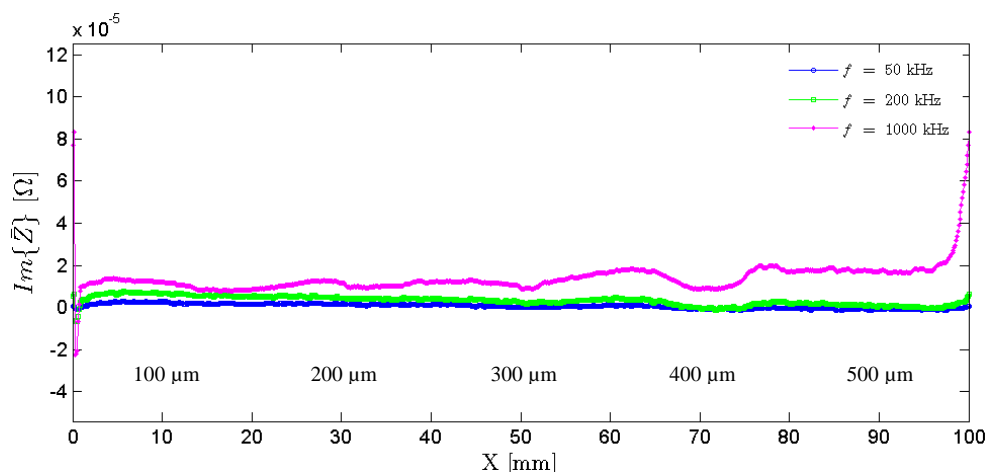


Figura 5.38 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$, 200 e 1000 kHz.

5.3.5.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Na Figura 5.39 encontram-se a componente real dos resultados da inspecção da chapa 6. Detectou-se com sucesso a presença dos furos localizados abaixo da primeira e segunda lâmina de alumínio, respectivamente, à frequência de 50 kHz. Detectou-se também o sinal que indicador da existência de um defeito real, abaixo da superfície da chapa, próximo de $X = 73$ mm.

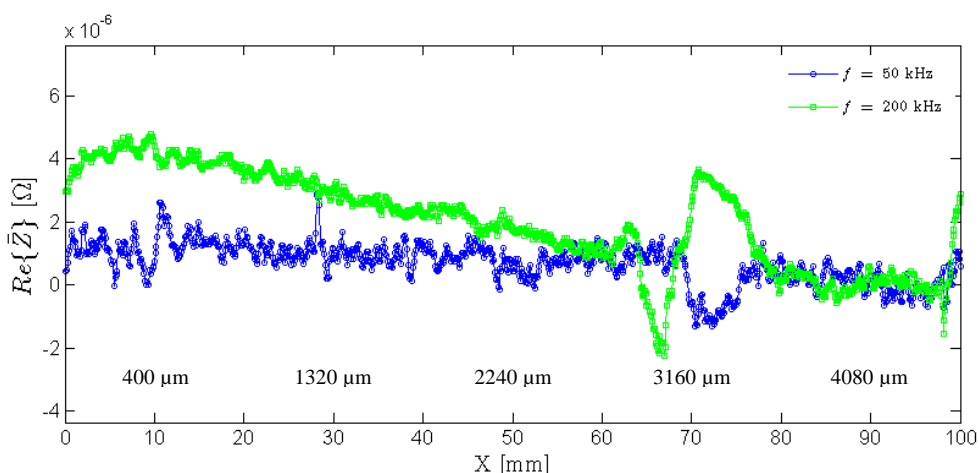


Figura 5.39 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$, e 200 kHz.

5.3.6 Resultados das Inspeções de Base com a Sonda #11

5.3.6.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

Analisando o gráfico da Figura 5.40 e Figura 5.41 observa-se a localização dos furos até à profundidade de 400 μm , na frequência de 50 e 100 kHz, respectivamente, a capacidade de detecção diminui para 200 μm à frequência de 1000 kHz.

O resultado da linha 8, Figura 5.42, revela a 50 kHz presença dos furos de 100 a 500 μm , profundidade que reduz para 400 μm à frequência de 100 kHz e 200 μm , nas demais frequências utilizadas.

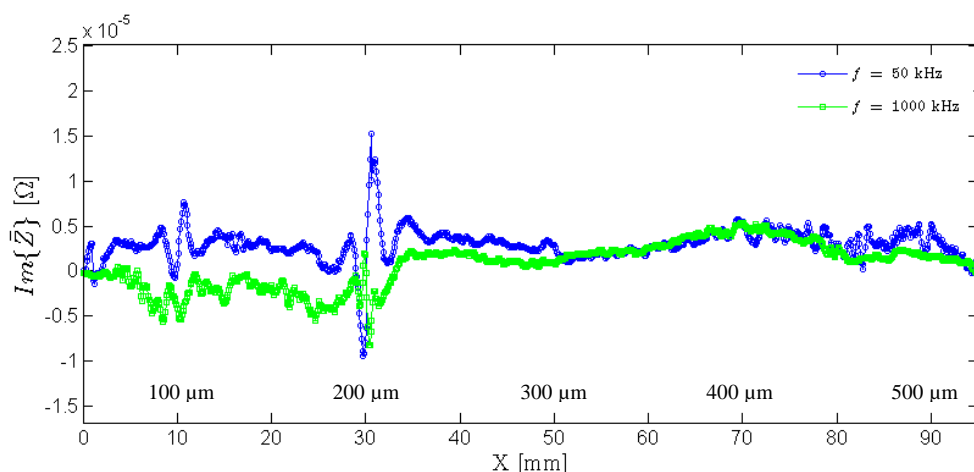


Figura 5.40 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50$ e 1000 kHz.

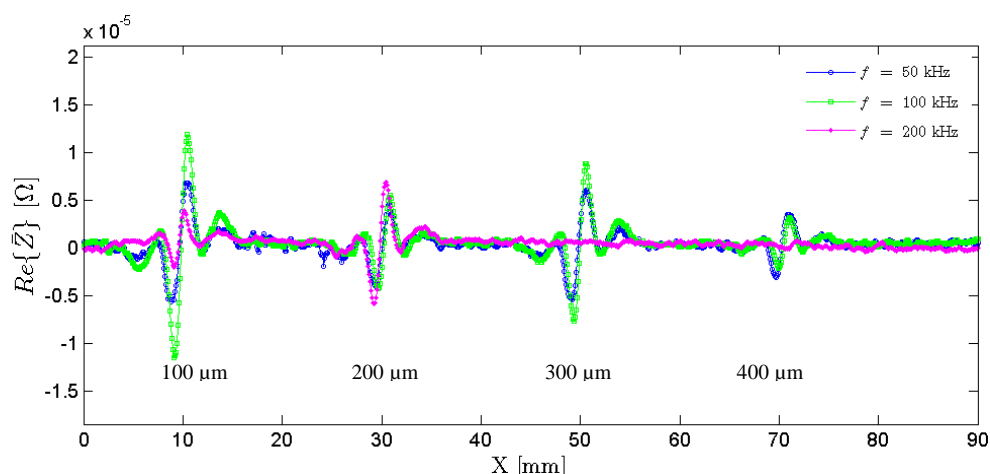


Figura 5.41 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

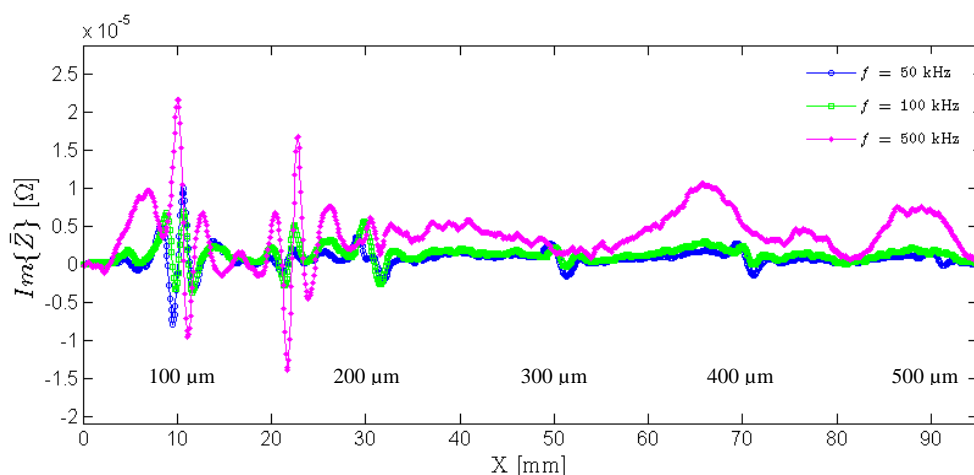


Figura 5.42 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 500 kHz.

5.3.6.2 Resultados na Chapa 2 (Al 5083-H12)

Da análise da Figura 5.43 e Figura 5.44, percebe-se claramente a capacidade da sonda em detectar o furo a 1300 μm de profundidade a uma frequência de 50 kHz. A frequência máxima à qual foram detectados defeitos foi de 500 kHz, atingindo-se a profundidade de 300 μm .

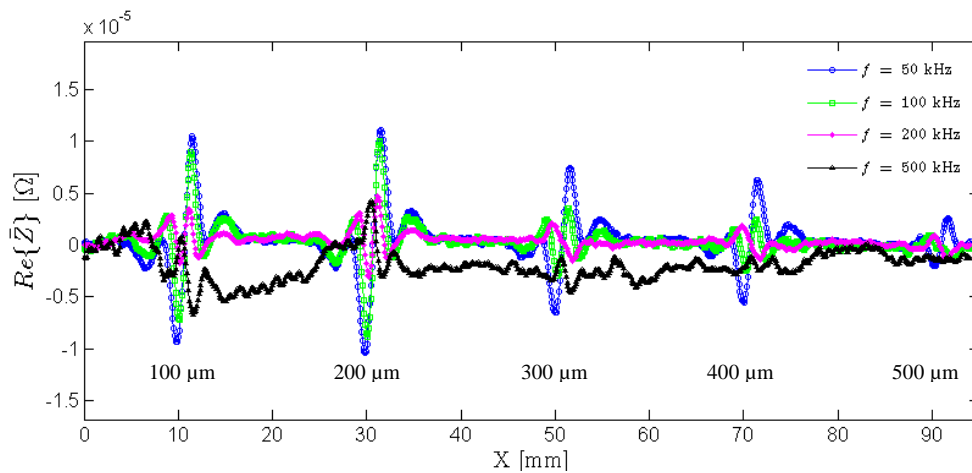


Figura 5.43 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100, 200$ e 500 kHz.

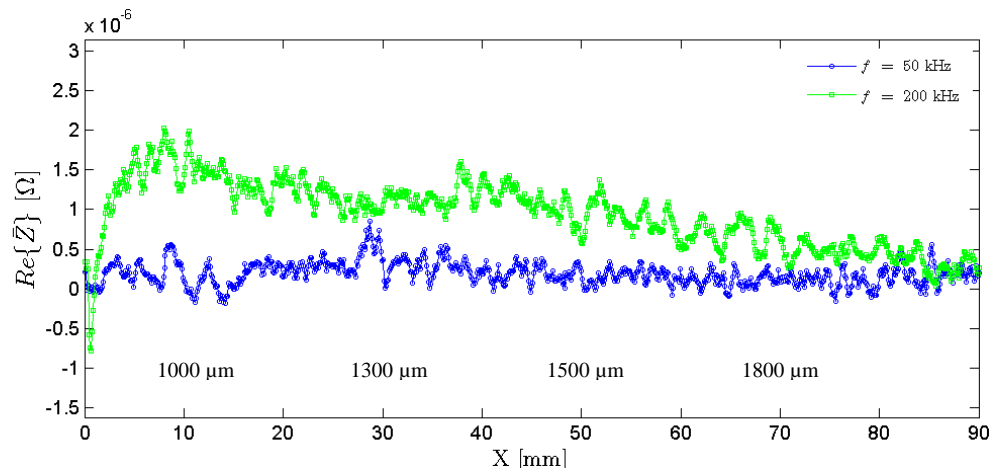


Figura 5.44 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.

5.3.6.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

Os resultados obtidos nas inspeções da chapa 3, Figura 5.45, permitem a observação de furos entre os 100 e os 500 μm . Apresenta-se no sinal a 50 e 100 kHz, a detecção do defeito localizado a 500 μm da superfície e 300 μm à frequência de 200 kHz. Frequências superiores não revelaram a presença de qualquer um dos defeitos.

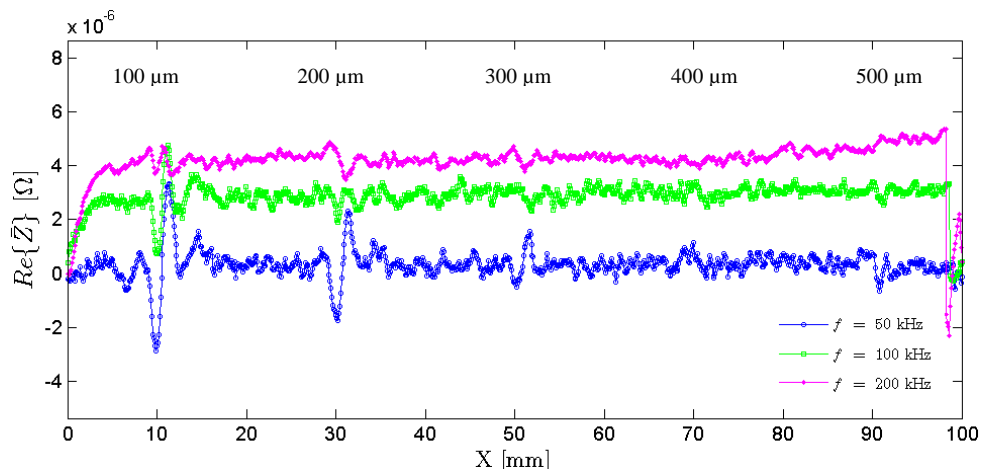


Figura 5.45 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

5.3.6.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

A Figura 5.46 não permite a observação do sinal de nenhum dos defeitos presentes na chapa, em toda a gama de frequências utilizadas.

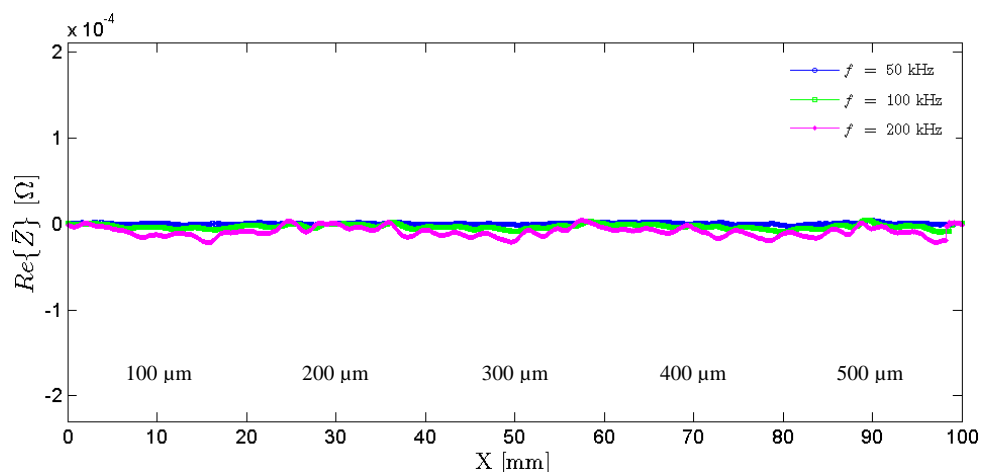


Figura 5.46 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

5.3.6.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

Na análise do gráfico da Figura 5.47 observa-se apenas a presença do furo a 100 μm a frequência de 50 kHz, a frequências superiores não foi possível detectar qualquer sinal indicador da presença de defeitos.

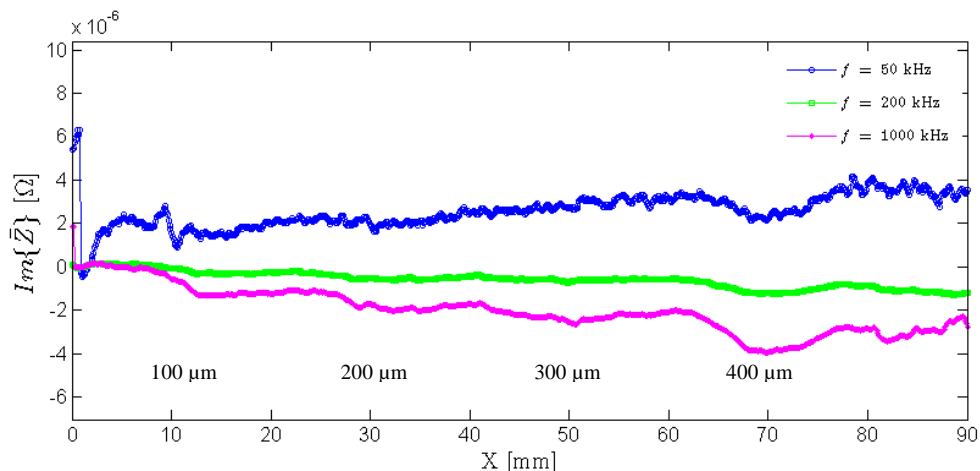


Figura 5.47 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50, 200$ e 1000 kHz .

5.3.6.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Na Figura 5.48 encontram-se a componente imaginária resultante da inspeção da chapa 6. Detectou-se exclusivamente a presença do defeito real que se encontra abaixo da superfície, em $X = 73 \text{ mm}$.

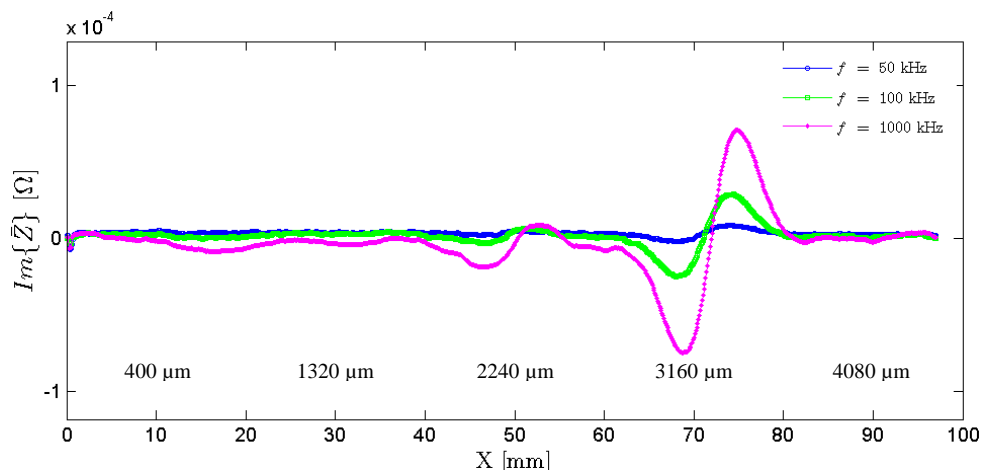


Figura 5.48 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 1000 kHz .

5.3.7 Resultados das Inspeções de Base com a Sonda #12

5.3.7.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

Observa-se nos gráficos da Figura 5.49, Figura 5.50 e Figura 5.51 o resultado das inspeções realizadas na chapa 1. O perfil do sinal presente nos gráficos apresenta o mesmo comportamento observado nos resultados da sonda *IONic* #2, contrariamente ao esperado o aumento do diâmetro do furo provoca uma diminuição na capacidade da sonda em detectar a presença de defeitos.

Analisando os gráficos referentes à linha 6 (Figura 5.49), é possível observar a presença de defeitos a profundidade entre 100 e 500 μm , sendo a frequência mais eficaz na detecção de 50 kHz, para a frequência de 100 e 200 kHz o furo mais profundo detectado situa-se a 400 e 200 μm da superfície, respectivamente.

No diâmetro de 1 mm (linha 7), Figura 5.50, detectou-se a presença do furo a 400 μm às frequências de 50 e 100 kHz e 300 μm a 200 kHz. Detectaram-se os furos com 2 mm de diâmetro nas frequências de 50, 100 e 200 kHz a uma distância máxima de 200 μm abaixo da superfície de inspeção.

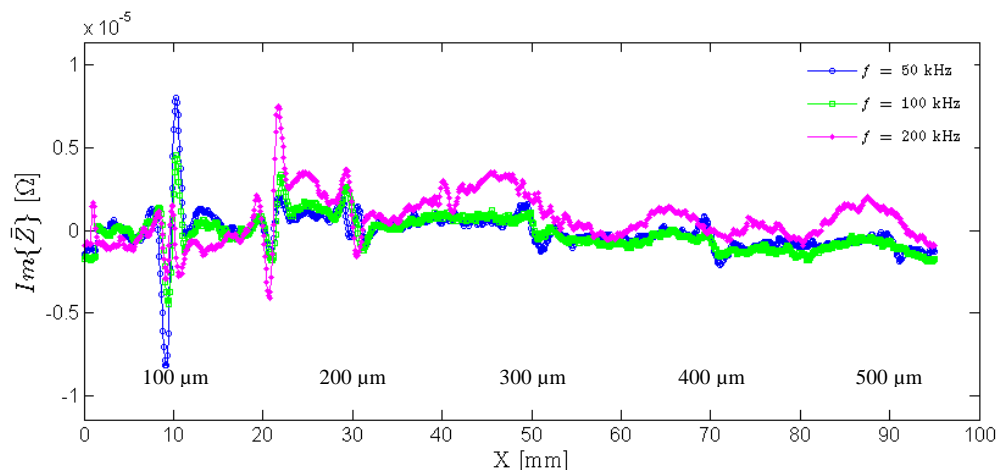


Figura 5.49 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz . Com factor de escala de $\times 1.5$, na linha 6.

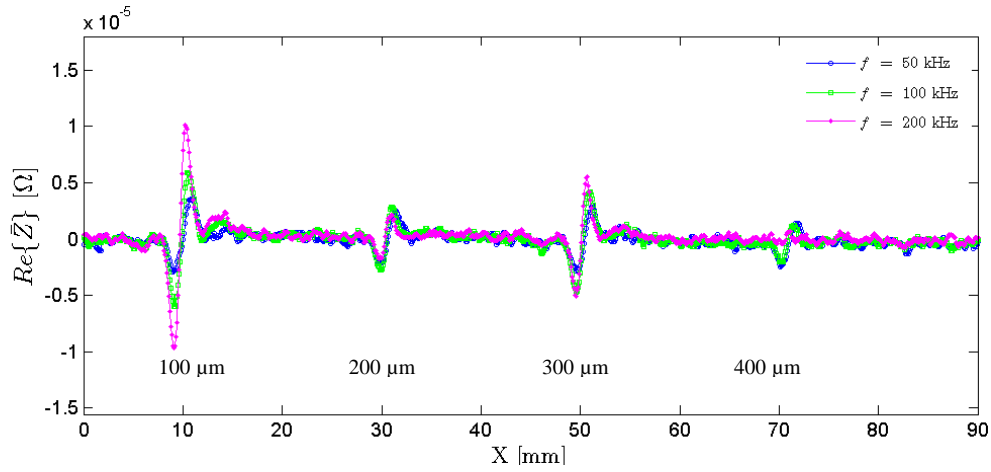


Figura 5.50 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

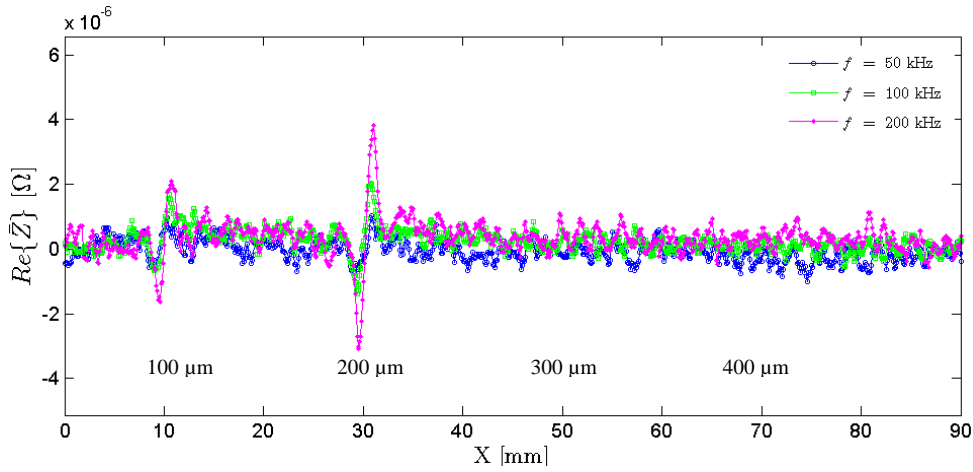


Figura 5.51 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

5.3.7.2 Resultados na Chapa 2 (Al 5083-H12)

No gráfico da Figura 5.52, observa-se a presença de furos entre 100 e 500 μm presentes na linha 6 a 50 e 100 kHz, na frequência de 200 kHz a detecção de defeitos não ultrapassou o furo localizado a 400 μm .

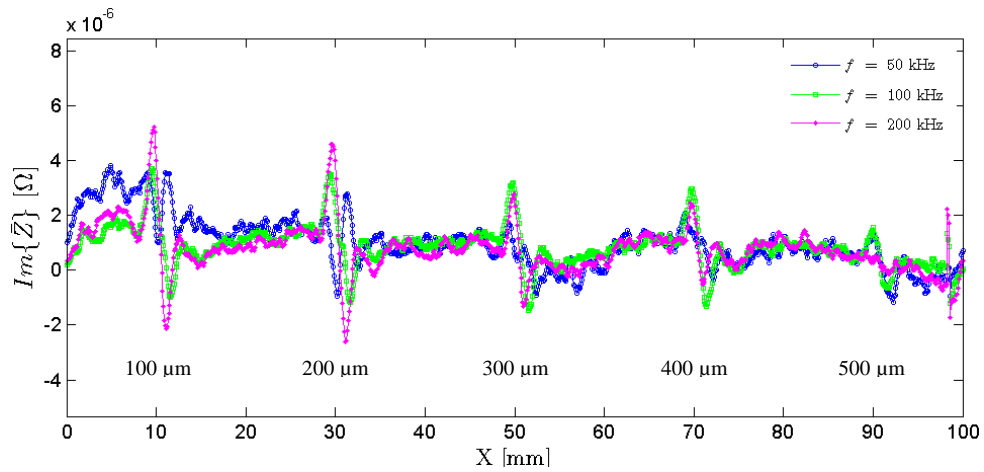


Figura 5.52 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

5.3.7.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

O resultado das inspeções realizadas na chapa 3, observado na Figura 5.53, apresenta-se com uma elevada componente de ruído, contudo exibe às frequências de 50 e 100 kHz a presença dos furos a 100 e 200 μ m de profundidade.

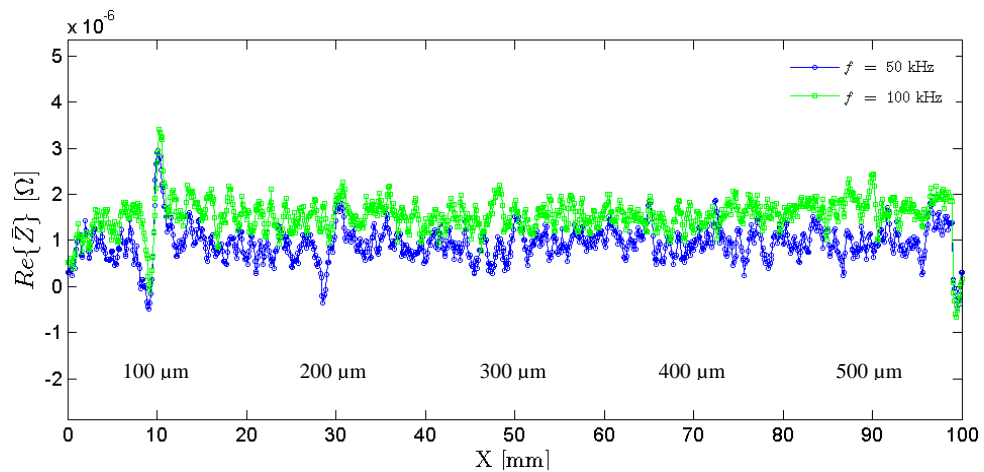


Figura 5.53 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 100 kHz.

5.3.7.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

O resultado dos trabalhos experimentais realizados na chapa (Figura 5.54), não exibem a presença de nenhum dos defeitos presentes na chapa.

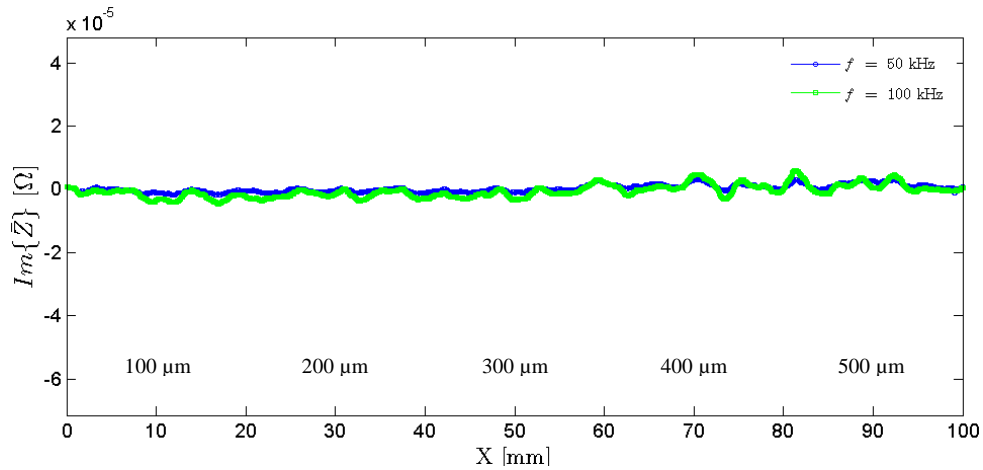


Figura 5.54 - Resultado experimental da Sonda IOnic #12 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 100 kHz.

5.3.7.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

Da análise do gráfico da Figura 5.55 não é possível distinguir-se nenhum sinal indicador da presença de defeitos.

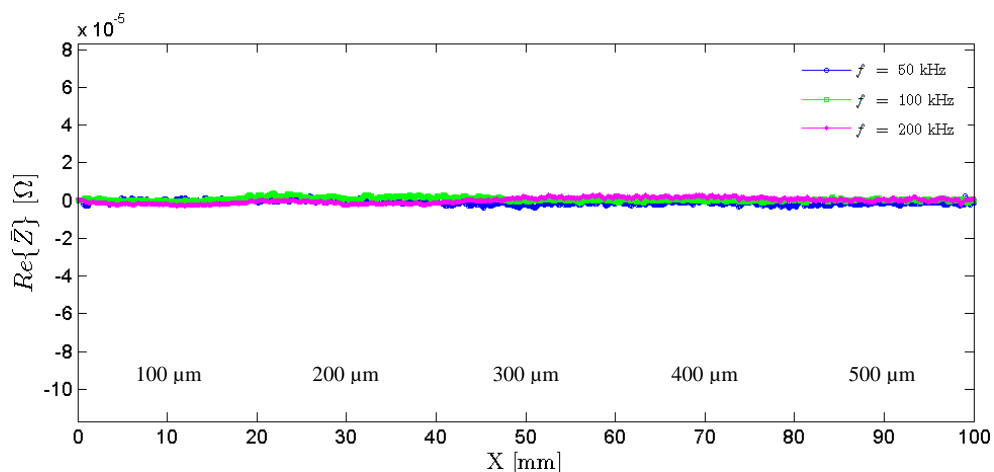


Figura 5.55 - Resultado experimental da Sonda IOnic #12 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$, 100 e 200 kHz.

5.3.7.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Os defeitos produzidos artificialmente na chapa 6, não foram detectados nas inspeções realizadas, como se observa na Figura 5.56.

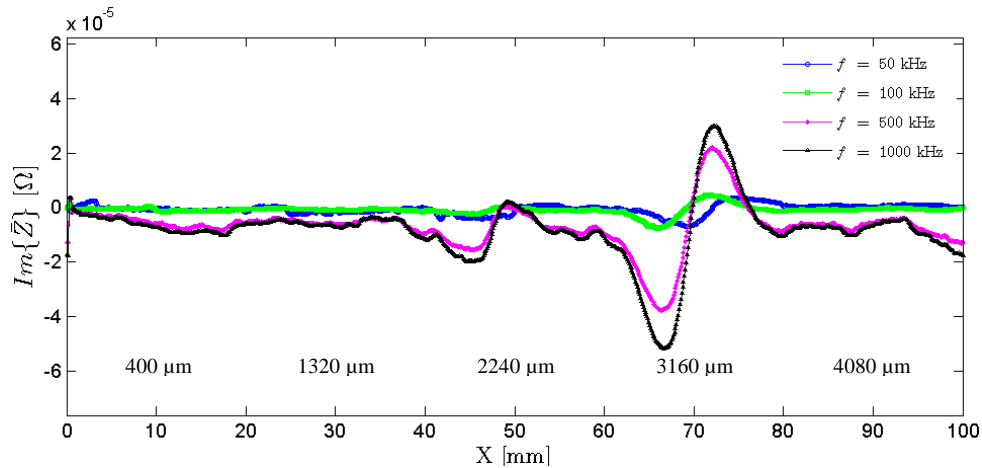


Figura 5.56 - Resultado experimental da Sonda IOnic #12 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100, 500$ e 1000 kHz.

5.3.8 Resultados das Inspeções de Base com a Sonda #13

5.3.8.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

Encontra-se na Figura 5.57, Figura 5.58 e Figura 5.59, o resultado das inspeções realizadas na linha 6, 7 e 8. Os ensaios da linha 6 (Figura 5.57) revelam a presença dos furos de 100 e 200 μm em todas as frequências representadas, as linhas com maior diâmetro de furo originaram um aumento da amplitude do sinal e consequentemente o aumento da eficácia da sonda, tendo-se detectado defeitos a 400 μm da superfície da chapa, a 50 e 100 kHz no caso da linha 7 e 50 kHz na linha 8. Com o aumento da frequência verificou-se uma diminuição na profundidade das CI no material.

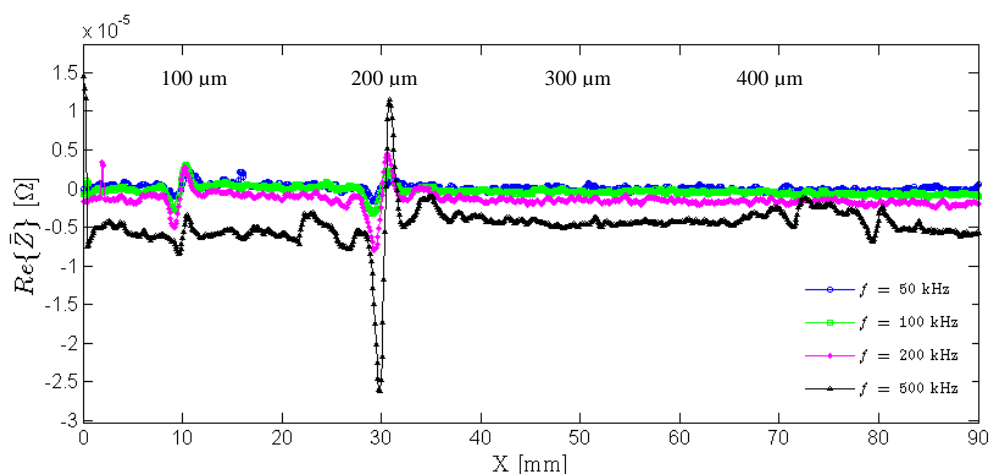


Figura 5.57 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

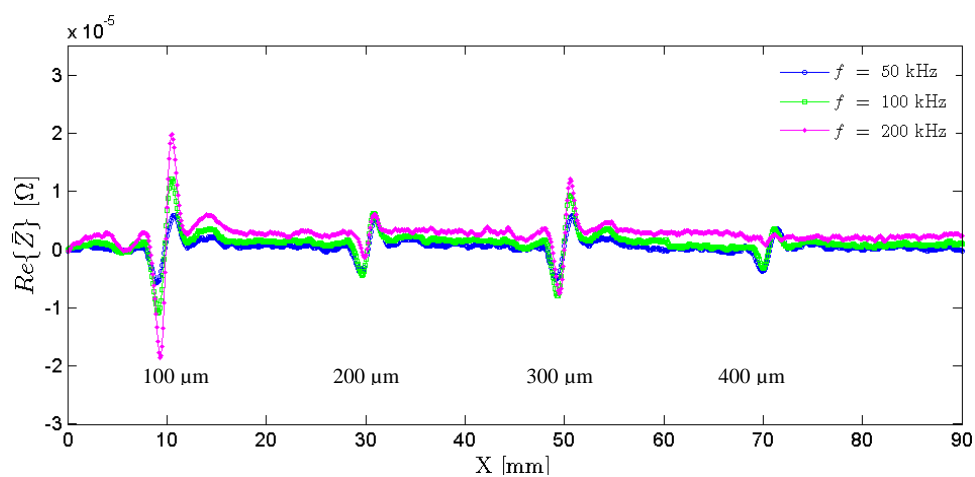


Figura 5.58 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

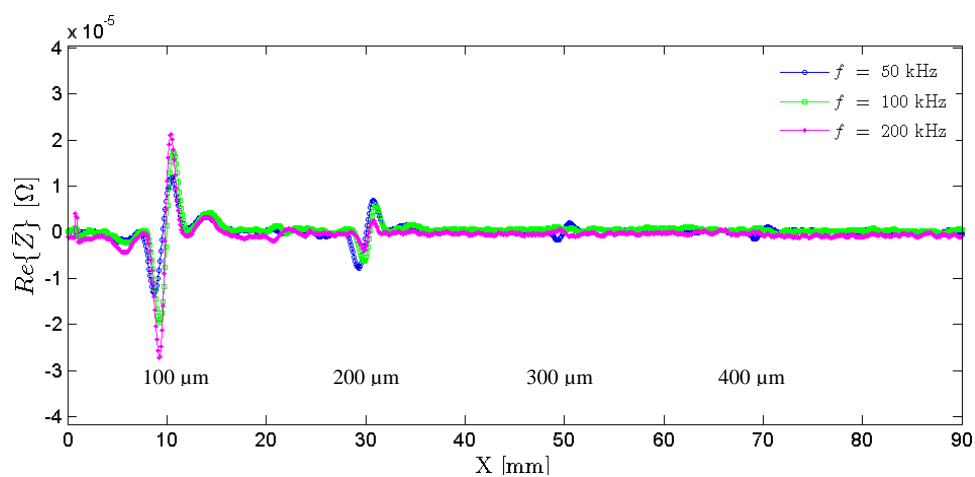


Figura 5.59 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

5.3.8.2 Resultados na Chapa 2 (Al 5083-H12)

Detectou-se nos ensaios na chapa 2 a presença de furos até 500 μm , nas frequências de 50, 100 e 200 kHz, como demonstrado na Figura 5.60.

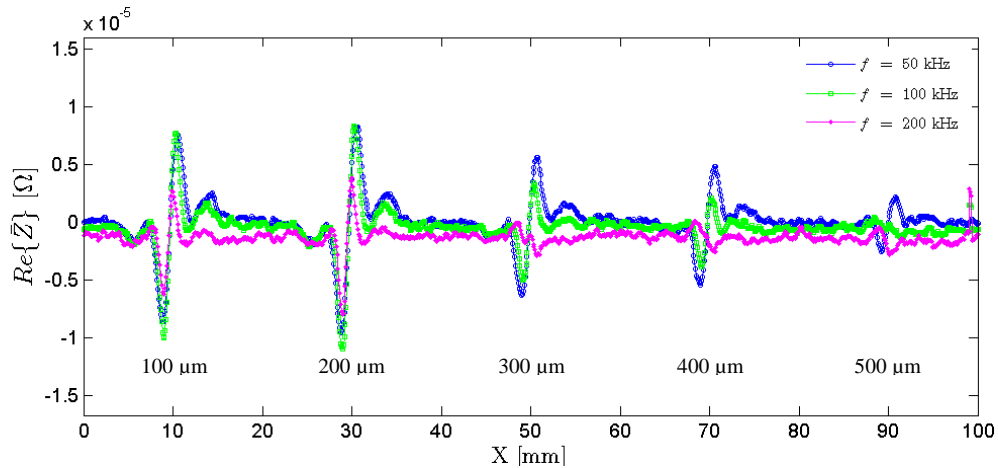


Figura 5.60 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

5.3.8.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

Na Figura 5.61 observa-se a presença de furos a 100, 200 e 300 μm de profundidade à frequência de 50 kHz, para a frequência de 100 kHz o furo mais profundo detectado encontra-se a 200 μm e para a frequência de 200 kHz apenas o furo a 100 μm aparece representado no gráfico. Para frequências superiores não se observou nos resultados a presença de qualquer furo.

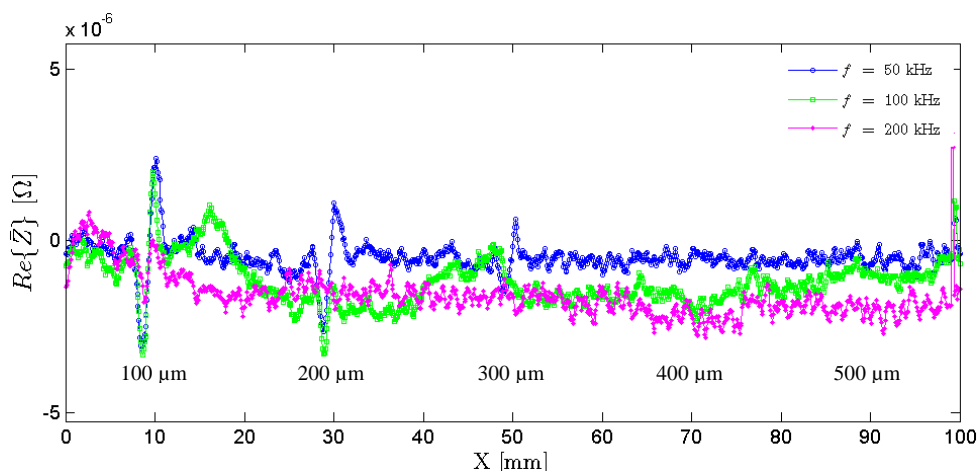


Figura 5.61 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

5.3.8.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

Observa-se na Figura 5.62, o resultado dos ensaios às frequências de 50, 100 e 200 kHz. Os resultados não permitem a identificação de defeitos na chapa.

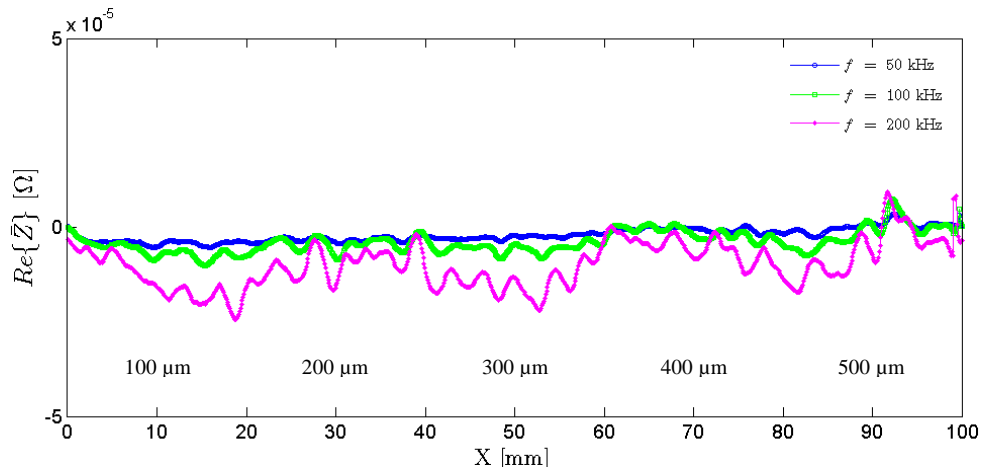


Figura 5.62 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

5.3.8.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

Na Figura 5.63 está representada a componente $Re(\vec{Z})$ do sinal proveniente de algumas inspeções realizadas na chapa 5, nenhum dos sinais apresenta o comportamento indicador da presença de defeito.

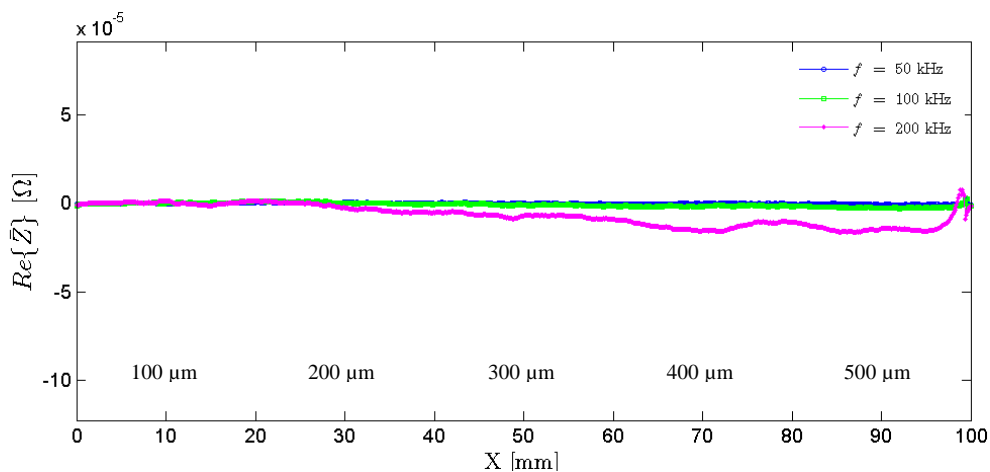


Figura 5.63 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

5.3.8.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Apenas foi detectado no gráfico da Figura 5.64, o defeito de fabrico presente na chapa de GLARE®, nenhum sinal indicador dos furos foi detectado.

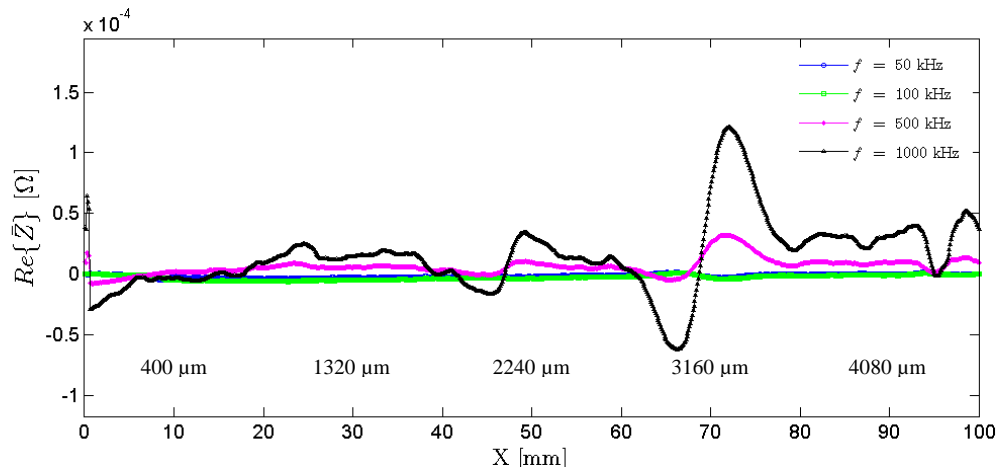


Figura 5.64 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100, 500$ e 1000 kHz.

5.3.9 Resultados das Inspeções de Base com a Sonda #14

5.3.9.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

Apresenta-se na Figura 5.65, Figura 5.66 e Figura 5.67 o resultado dos trabalhos realizados na chapa 1, foi detectada a presença de defeitos até 200 μm para as três frequências apresentadas na linha 6 e 400 μm linha 7, na linha 8 detectou-se a presença dos furos de 100 a 400 μm para a frequência de 50 kHz, reduzindo-se para 200 μm nas frequências superiores.

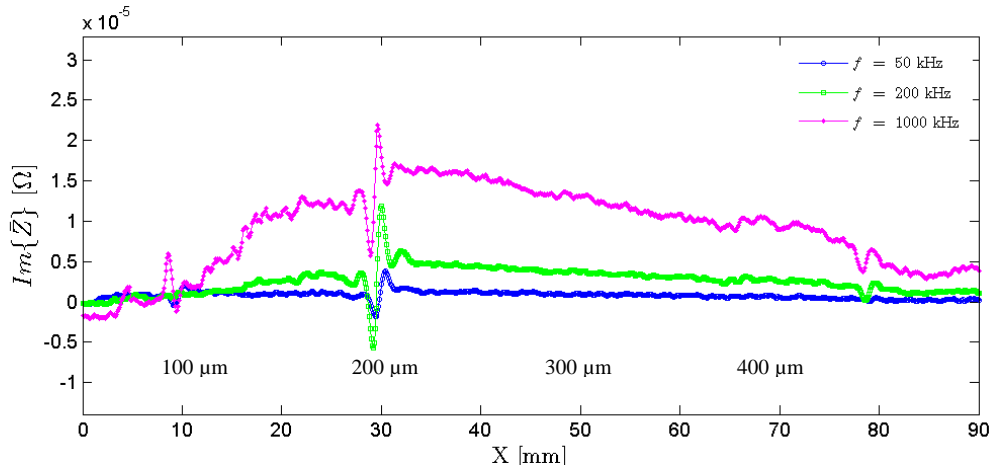


Figura 5.65 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

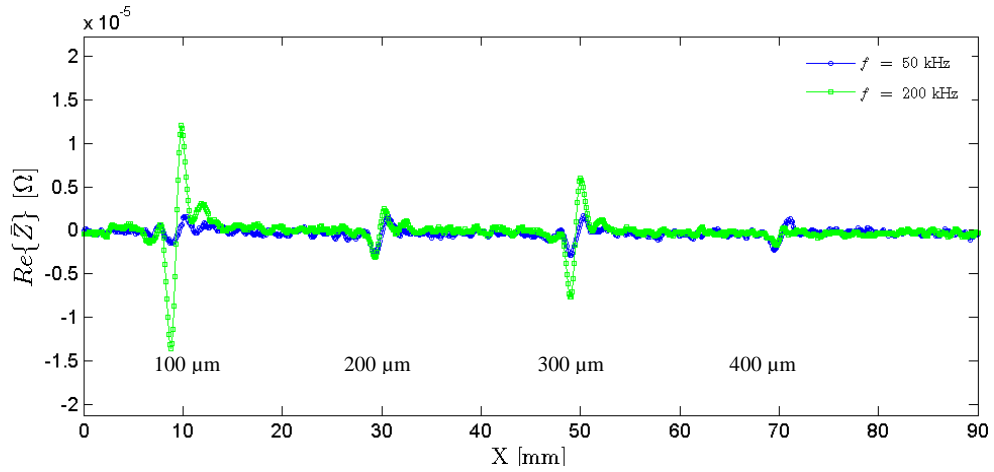


Figura 5.66 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.

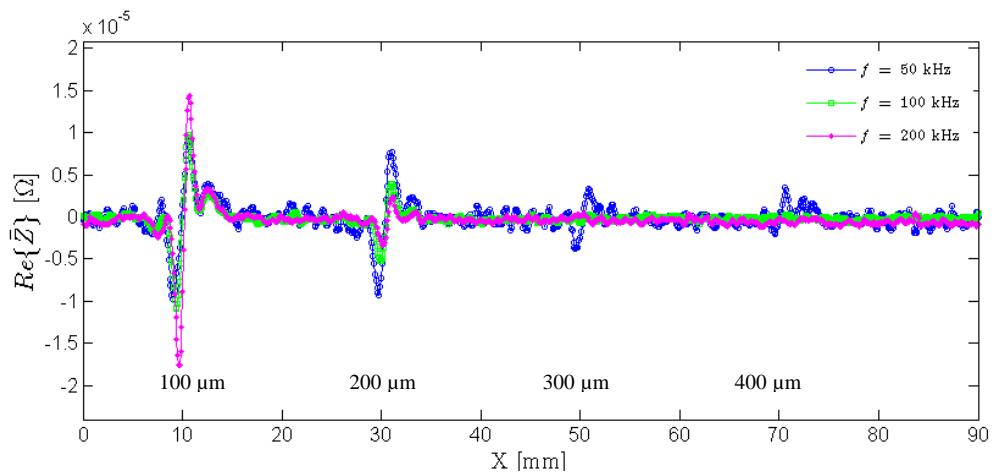


Figura 5.67 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz. Com factor de escala de $\times 1.5$, na linha 6.

5.3.9.2 Resultados na Chapa 2

Na Figura 5.68 apresenta-se a componente $Im(\vec{Z})$ dos varrimentos realizados à chapa 2, onde foi detectada a presença de todos os furos da linha 6, nas frequências de 50 a 200 kHz.

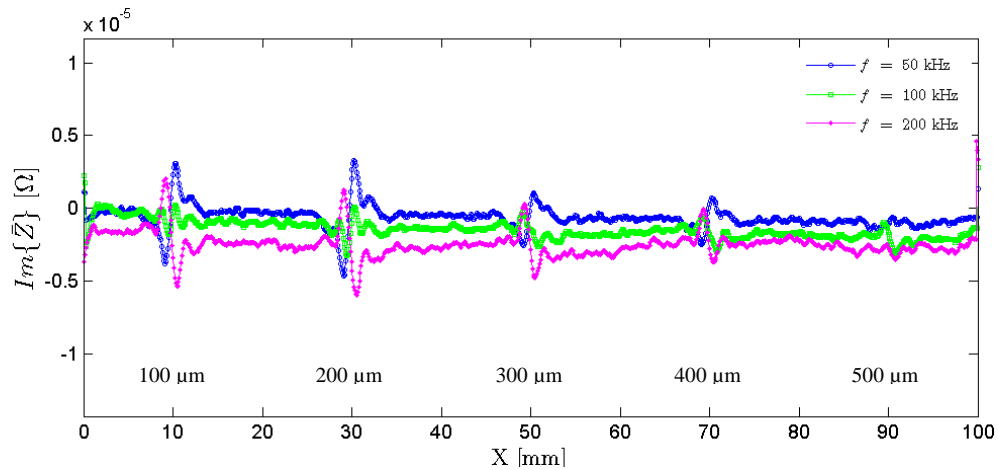


Figura 5.68 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

5.3.9.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

Observa-se na Figura 5.69 a presença de defeitos até $300 \mu\text{m}$ abaixo da superfície da chapa à frequência de 100 kHz, das frequências de 50 e 200 kHz detectou-se a presença de furos a 100 e $200 \mu\text{m}$ respectivamente.

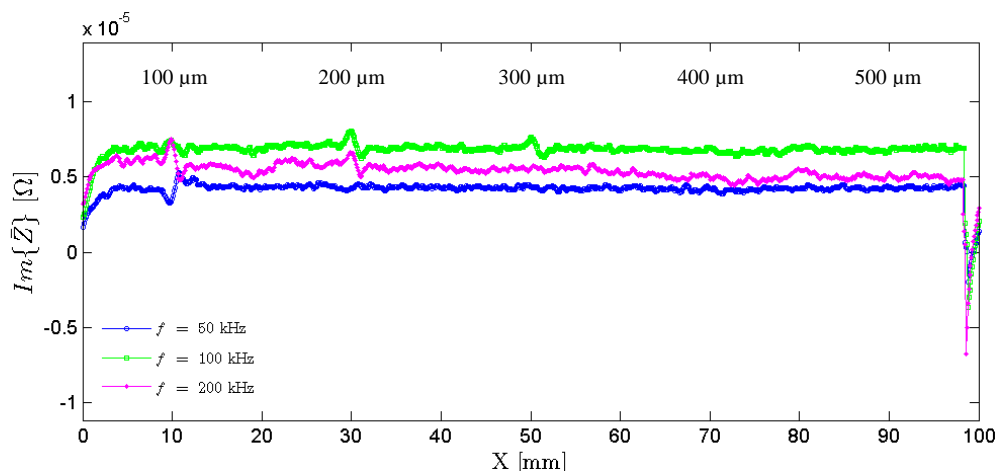


Figura 5.69 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz.

5.3.9.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

Na Figura 5.70, não se observa nenhuma variação do valor $Re(\vec{Z})$ que revele a presença de defeitos, em toda a gama de frequências utilizadas.

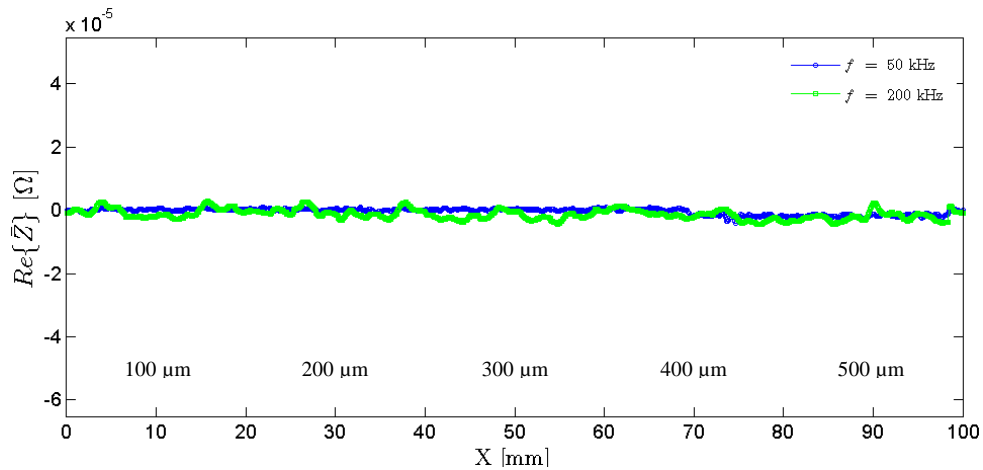


Figura 5.70 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.

5.3.9.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

A sonda *IOnic* #14, não se mostrou eficiente a detectar os defeitos produzidos na chapa 5, apresenta-se na Figura 5.71 o gráfico dos sinais obtidos nas frequências de 50 e 200 kHz.

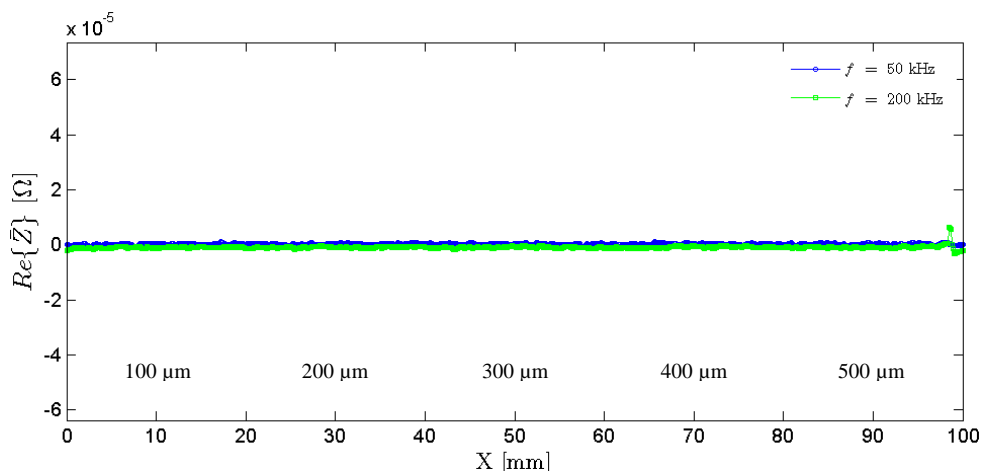


Figura 5.71 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.

5.3.9.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Na Figura 5.72 encontram-se a componente real dos resultados da inspecção à chapa 6. Apresenta-se no gráfico o defeito de fabrico perto de $X = 73$ mm, como referido anteriormente. Na frequência de 1000 kHz surge um segundo sinal em $X = 50$ mm indicador da presença de um segundo defeito não detectado nos ensaios das restantes sondas, embora este sinal esteja localizado na posição de um dos furos, nenhum sinal representativo dos furos a menor profundidade é observado, assim sendo não é possível afirmar que a sonda detectou o defeito localizado abaixo da terceira lâmina de alumínio.

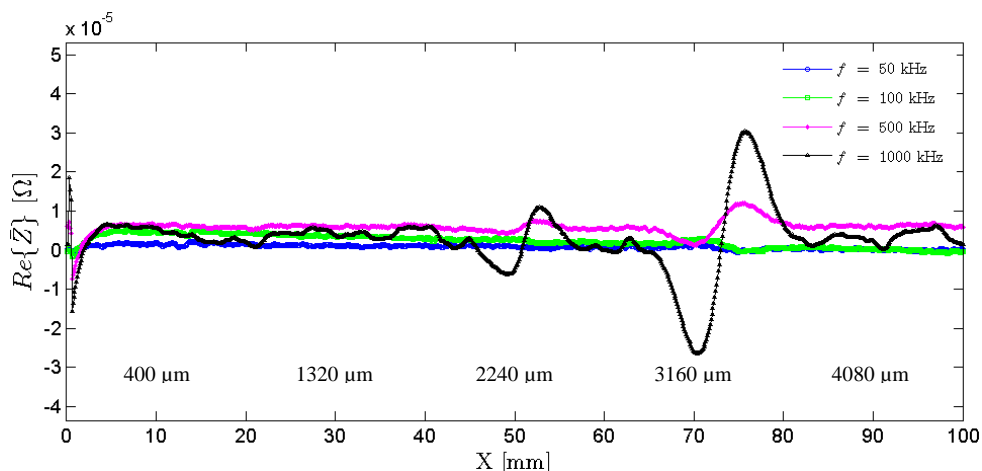


Figura 5.72 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50, 100, 500$ e 1000 kHz.

5.3.10 Resultados das Inspeções de Base com a Sonda AB4

5.3.10.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

O resultado do estudo da chapa 1 é apresentado na Figura 5.73, Figura 5.74 e Figura 5.75, foi possível a detecção do furo a 100 e 200 μm da superfície na linha 6 às frequências de 200 e 1000 kHz, 300 μm à frequência de 200 kHz na linha 7 e 200 μm a 200 kHz na linha 7. Neste caso o aumento do diâmetro dos furos não revelou uma melhoria significativa nos resultados obtidos, a amplitude do sinal diminuiu assim como as frequências às quais foi possível observar a presença de defeitos.

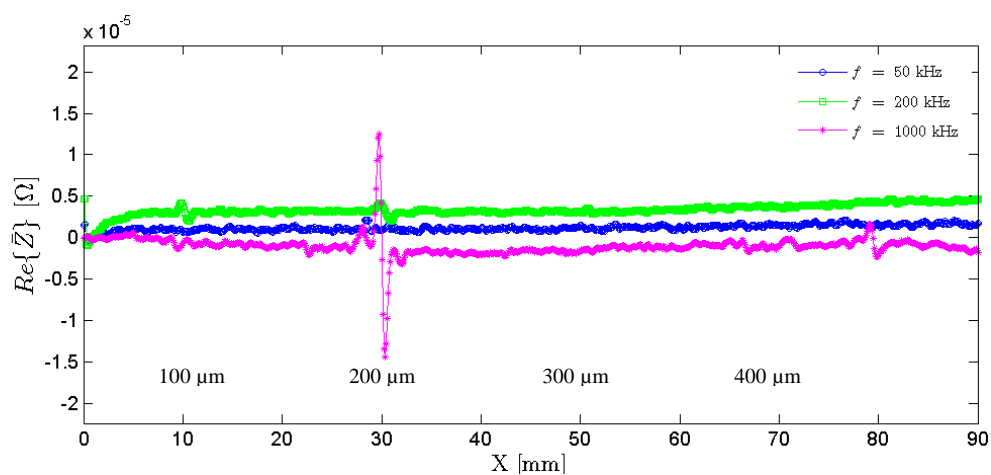


Figura 5.73 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 50, 200$ e 1000 kHz.

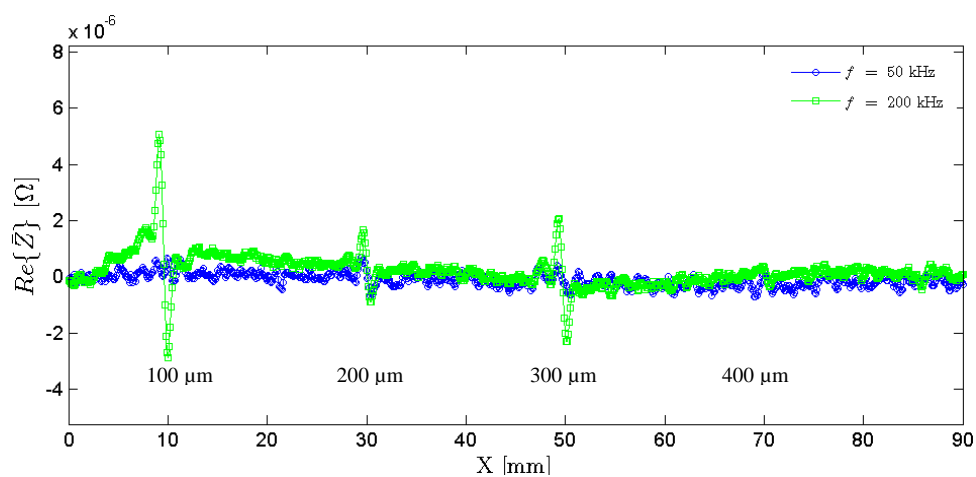


Figura 5.74 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.

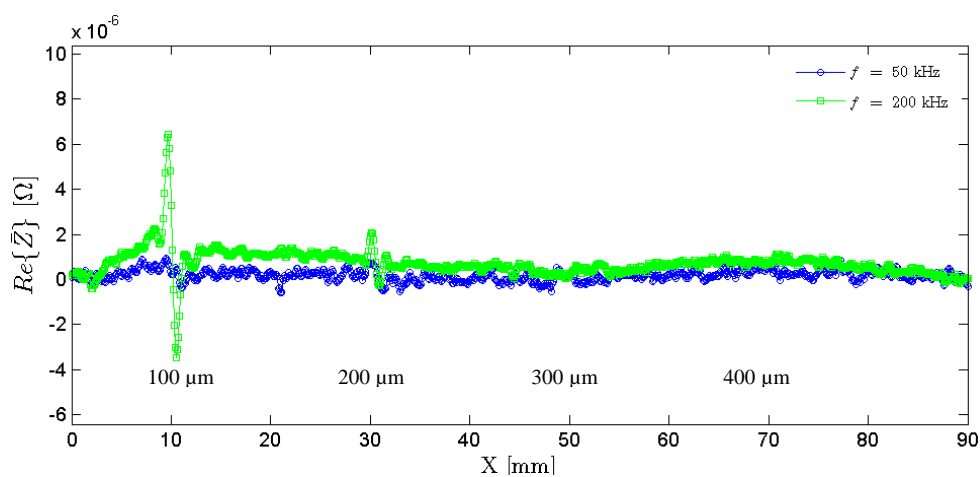


Figura 5.75 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 50, 200$ kHz.

5.3.10.2 Resultados na Chapa 2 (Al 5083-H12)

Os resultados experimentais apresentados na Figura 5.76, referentes à chapa 2 demonstram a presença dos defeitos de 100 a 300 μm às frequências de 50 e 100 kHz e a diminuição da detecção dos defeitos para 200 μm para a frequência de 200 kHz.

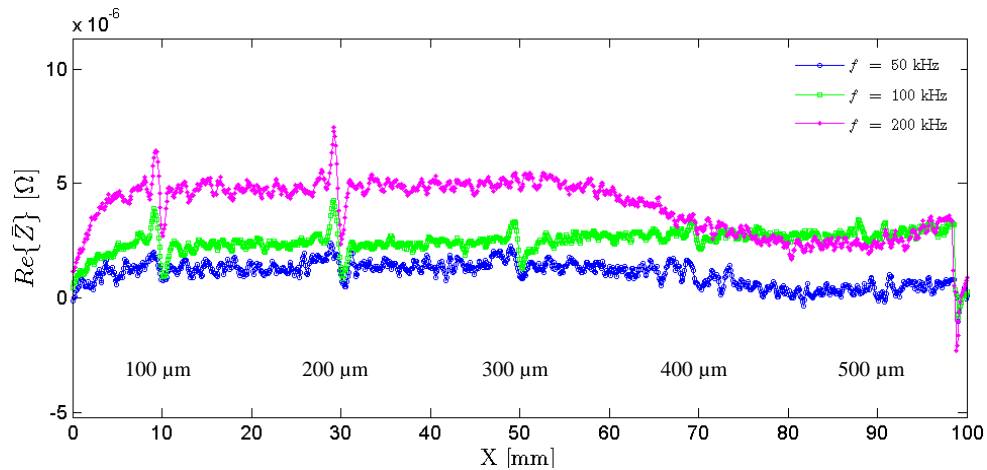


Figura 5.76 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

5.3.10.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

Os resultados experimentais apresentados na Figura 5.77, referentes à chapa 3 mostram a existência do furo a 100 μm nas frequências de 50 e 200 kHz, na 100 kHz não foi detectado nenhum defeito.

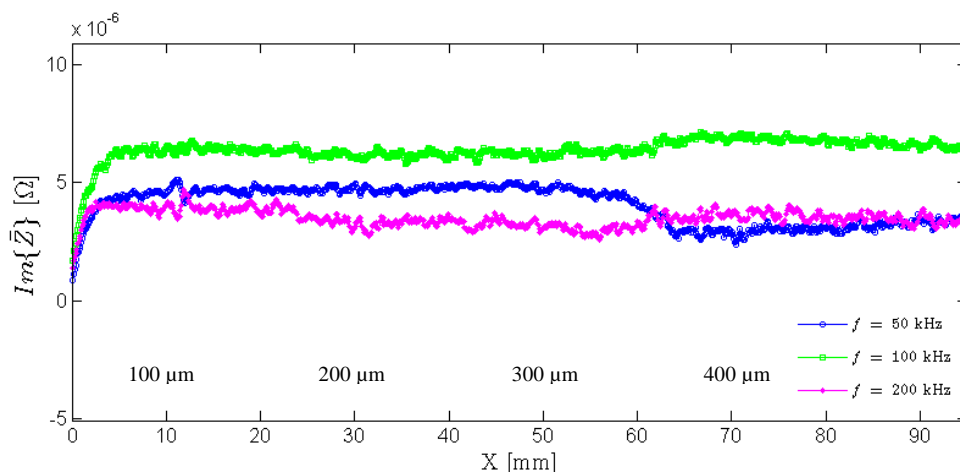


Figura 5.77 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 50, 100$ e 200 kHz .

5.3.10.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

Verifica-se na Figura 5.78 que não existe qualquer perturbação do sinal representativa da presença dos furos, apenas ruído proveniente da superfície irregular do provete.

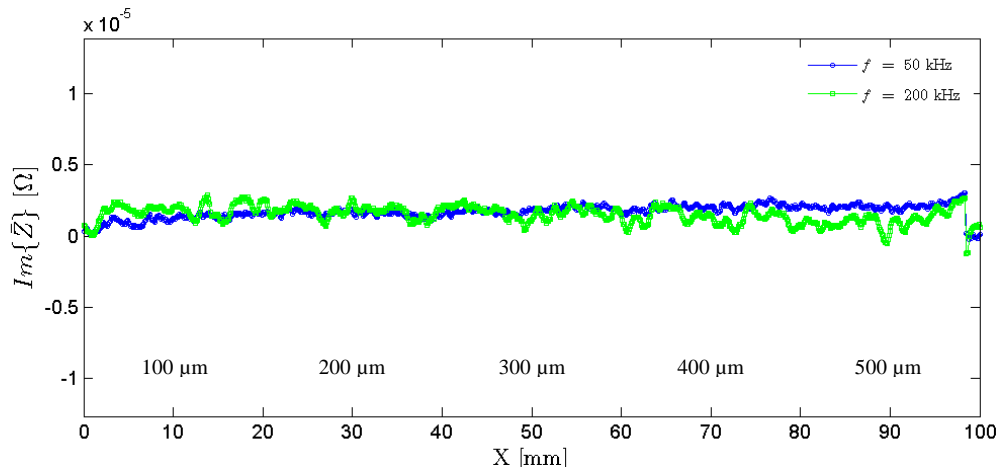


Figura 5.78 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.

5.3.10.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

O gráfico apresentado na Figura 5.79 apresenta a incapacidade da sonda AB4 na detecção de qualquer um dos furos existentes no provete. Os resultados a frequências mais elevadas foram semelhantes, em nenhum dos casos se detectou a presença de furos.

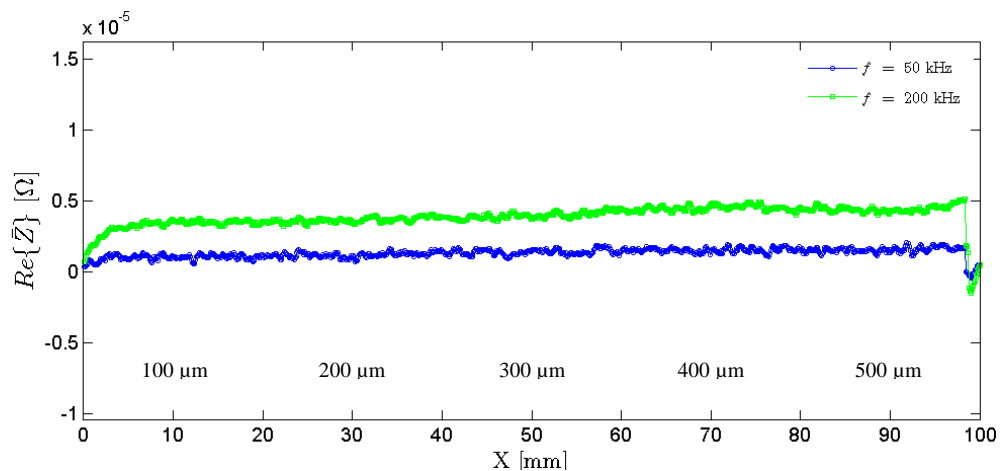


Figura 5.79 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 50$ e 200 kHz.

5.3.10.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Observa-se na Figura 5.80 o valor $Im(\vec{Z})$ do trabalho realizado na chapa 6, tal como no sinal da sonda #14, os resultados mostram (para $f=200$ e 1000 kHz) a presença do defeito de fabrico ($X=73$) e um outro na localização do furo que atravessa as lâminas 4, 5 e 6 de alumínio da chapa.

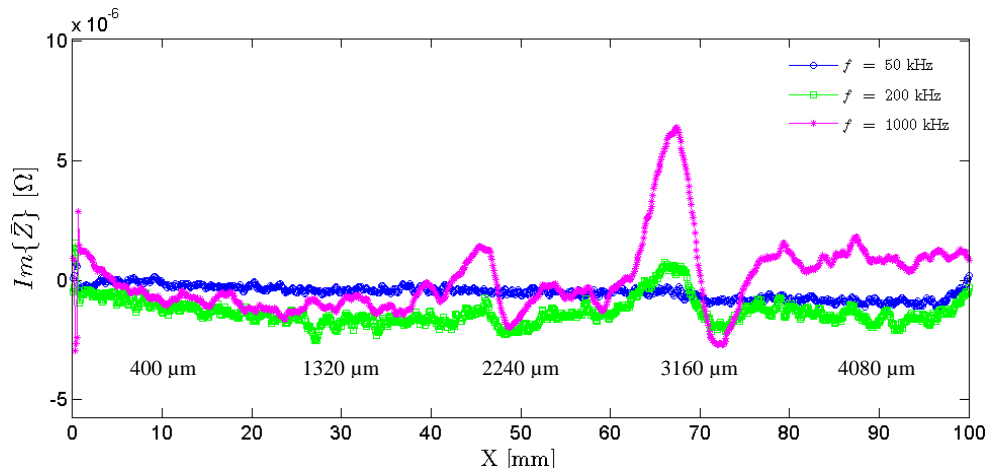


Figura 5.80 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f=50$, 200 e 1000 kHz.

5.3.11 Resultados das Inspeções de Base com a Sonda *IONic* Bobina

5.3.11.1 Resultados na Chapa 1 (Al 1100)

Na Figura 5.81, Figura 5.82 e Figura 5.83, apresenta-se o sinal da sonda *IONic* com bobina, nas inspeções realizadas na chapa 1. Percebe-se claramente a capacidade da sonda em detectar todos os defeitos dos três diâmetros diferentes presentes na chapa, à exceção da frequência de 50 kHz no ensaio da linha 6 (Figura 5.81) que a profundidade máxima detectada foi de 400 µm, todos os demais ensaios nas três frequências permitiram a observação de furos até 500 µm. Observa-se também o acréscimo na amplitude do sinal com o aumento do diâmetro de furo.

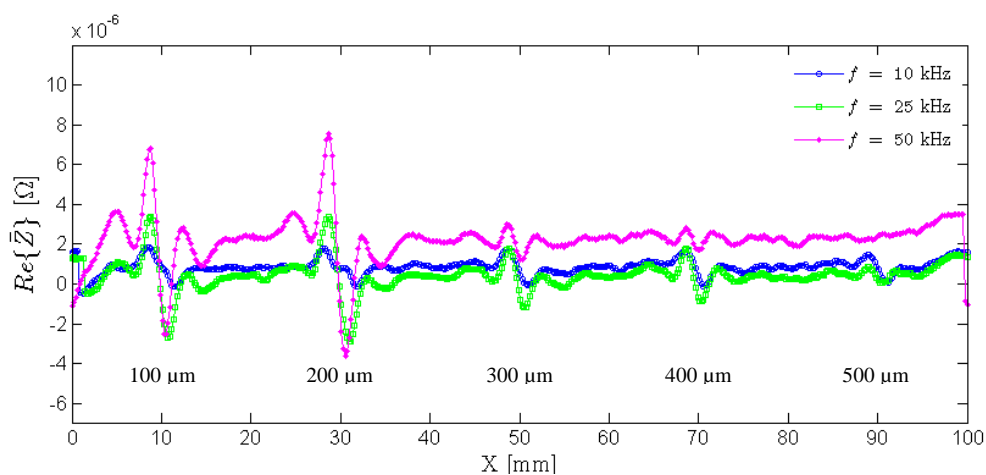


Figura 5.81 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 ($\varnothing = 0.5$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.

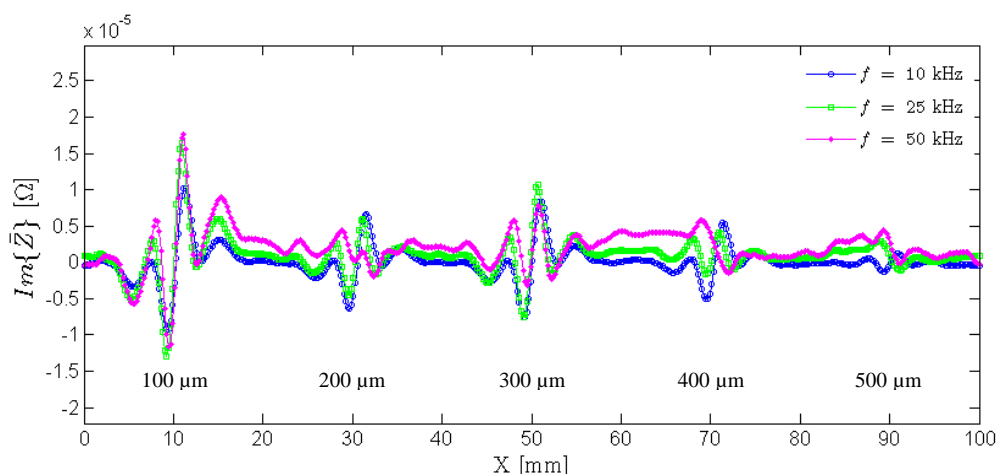


Figura 5.82 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.

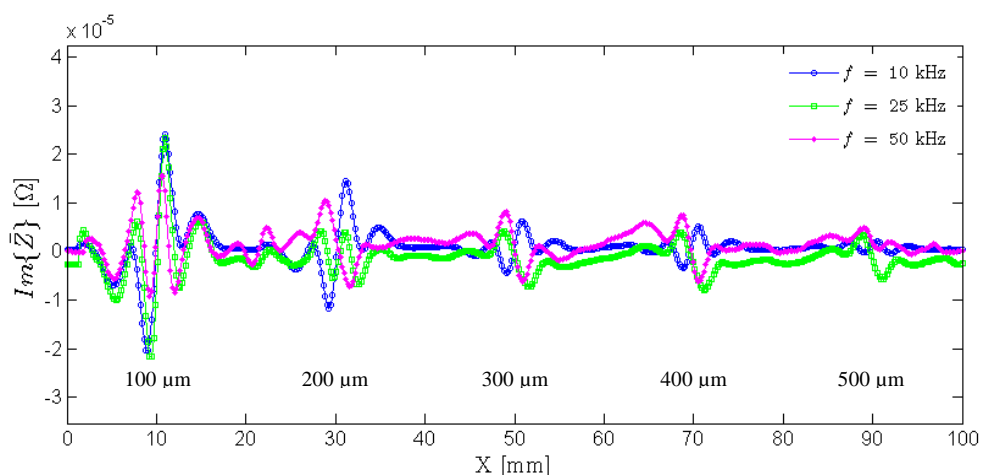


Figura 5.83 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 ($\varnothing = 2$ mm) @ $f = 10, 25$ e 50 kHz.

5.3.11.2 Resultados na Chapa 2 (Al 5083-H12)

Da inspeção da chapa 2 detectou-se com sucesso a existência de furos até 1800 μm de profundidade. Apresenta-se no gráfico da Figura 5.84 a variação na amplitude do sinal $Re\{\vec{Z}\}$ indicadora da presença dos furos da linha 6, a uma distância da superfície entre 100 e 500 μm , e na Figura 5.85, frequência de 25 e 50 kHz observa-se a o sinal referente ao furo de 1000 μm com a diminuição da frequência para 10 kHz a profundidade de penetração aumenta e detectam-se os furos a 1000, 1300, 1500 e 1800 μm de profundidade.

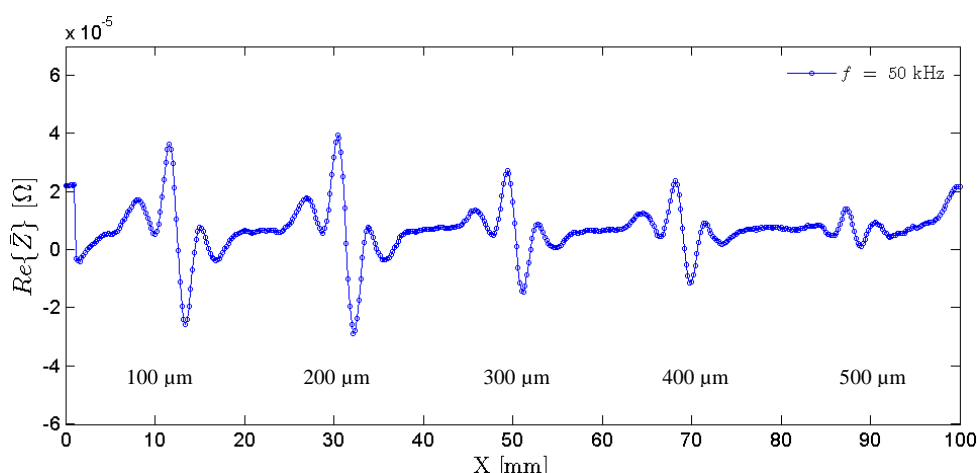


Figura 5.84 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) @ $f = 50 \text{ kHz}$.

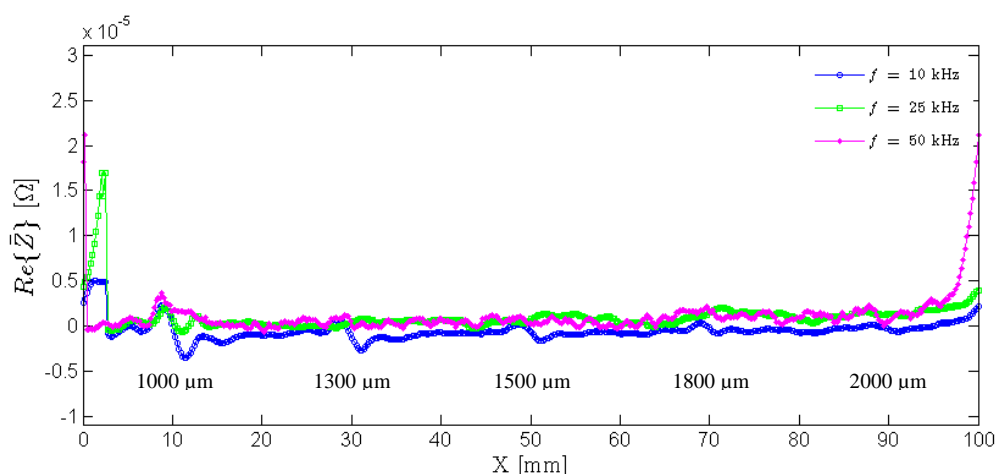


Figura 5.85 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) @ $f = 10, 25 \text{ e } 50 \text{ kHz}$.

5.3.11.3 Resultados na Chapa 3 (Al 6061-T6)

Nas inspeções realizadas na chapa 3, o sinal da sonda *IONic* indicou a presença dos defeitos até 500 μm da superfície da chapa nas frequências de 10 e 25 kHz (Figura 5.86) e na Figura 5.87 observa-se a profundidade máxima atingida, 1300 μm na linha 7 à frequência de 10 kHz.

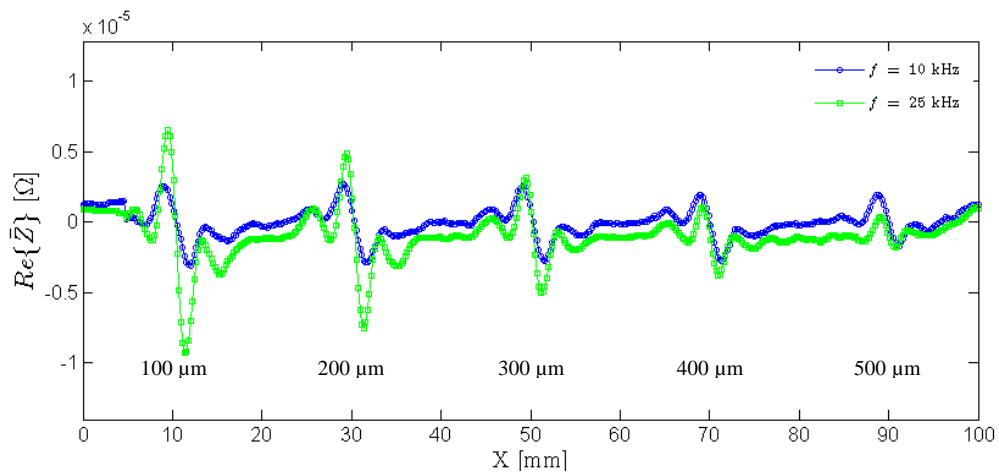


Figura 5.86 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 10$ e 25 kHz.

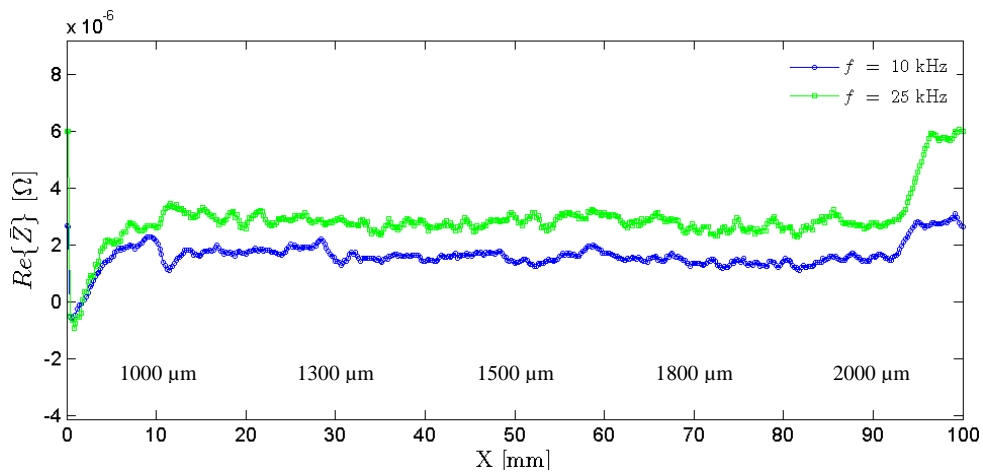


Figura 5.87 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 7 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 10$ e 25 kHz.

5.3.11.4 Resultados na Chapa 4 (AISI 1012/15)

Observa-se na Figura 5.88 o gráfico da componente $Re(\vec{Z})$ do sinal da sonda, não apresentando este qualquer perturbação representativa da existência dos defeitos, apenas se observa algum ruído originado pela superfície do provete.

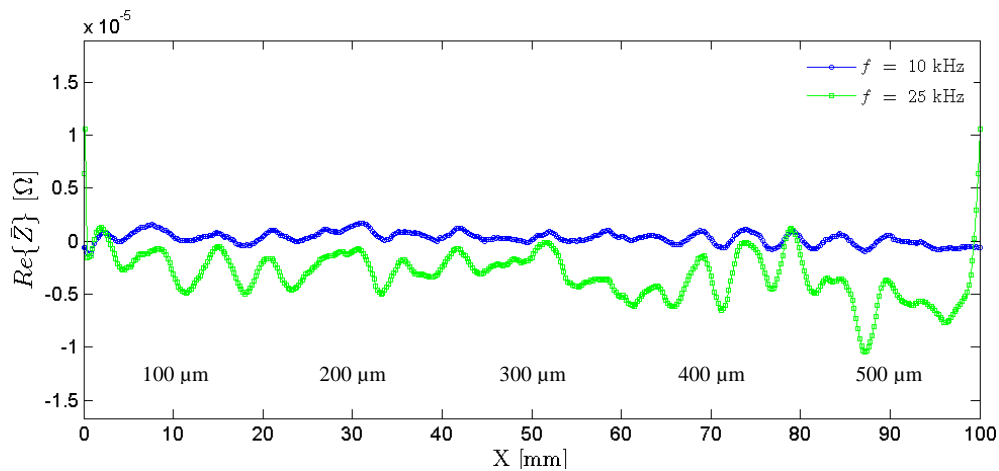


Figura 5.88 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 4, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.

5.3.11.5 Resultados na Chapa 5 (Cobre)

Na análise do gráfico da Figura 5.89, distingue-se o sinal representativo da presença de furos entre 100 e 300 μ m de profundidade no ensaio realizado a 10 kHz, a eficácia da sonda apresenta uma redução a 25 kHz, observando-se apenas a presença do defeito a 100 μ m.

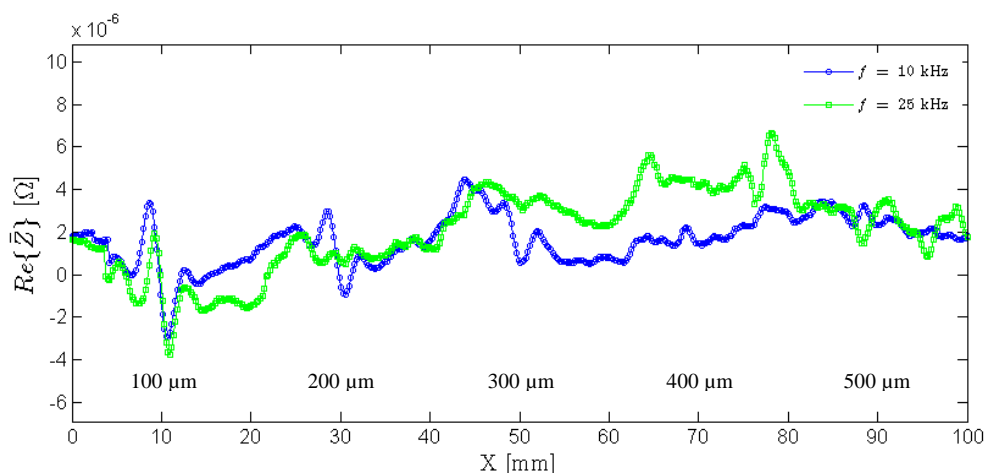


Figura 5.89 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 5, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.

5.3.11.6 Resultados na Chapa 6 (GLARE®)

Apresenta-se na Figura 5.90 o melhor resultado obtido entre as diferentes sondas na chapa 6, a presente sonda mostra-se eficaz na detecção dos furos imediatamente abaixo da 1ª e 2ª lâmina de alumínio, juntamente com o defeito de fabrico às frequências de 10 e 25 kHz.

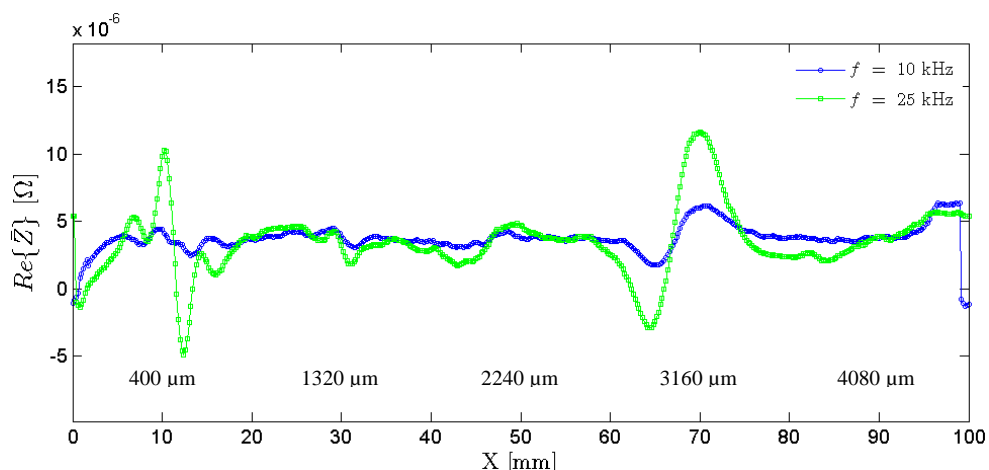


Figura 5.90 - Resultado experimental da Sonda IOnic com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 6, linha 1 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.

5.3.11.7 Resultados na Chapa 7 (AISI 304)

Observa-se no gráfico da Figura 5.91 a capacidade da sonda em detectar a totalidade dos defeitos existentes na linha 6, à frequência de 100 kHz. Importa referir que embora não se observe claramente no gráfico, os ensaios realizados a frequências inferiores revelam também a presença dos furos até a profundidade de 500 μm .

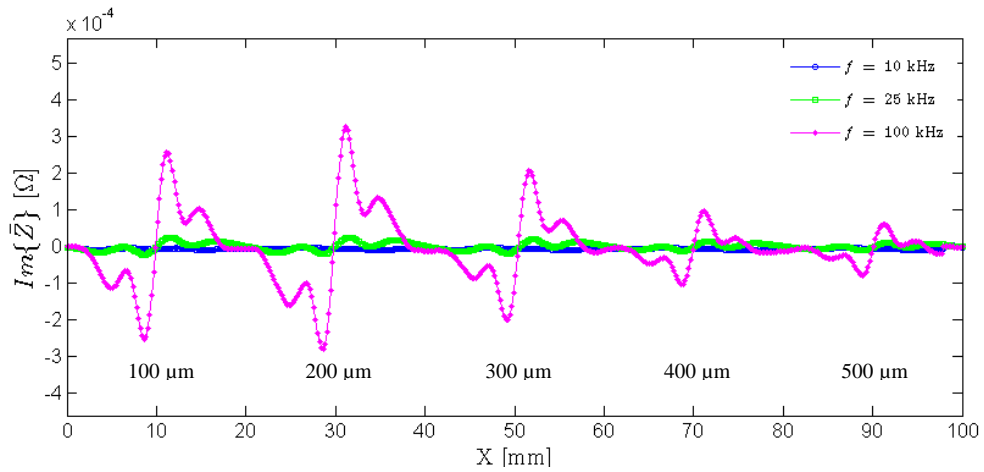


Figura 5.91 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10, 25$ e 100 kHz.

5.3.11.8 Resultados na Chapa 8 (GG 25)

O gráfico apresentado na Figura 5.92 não mostra qualquer indicação da presença dos furos existentes no provete. O resultado das inspeções a frequências mais elevadas foram semelhantes, em nenhum dos casos se detectou a presença de furos.

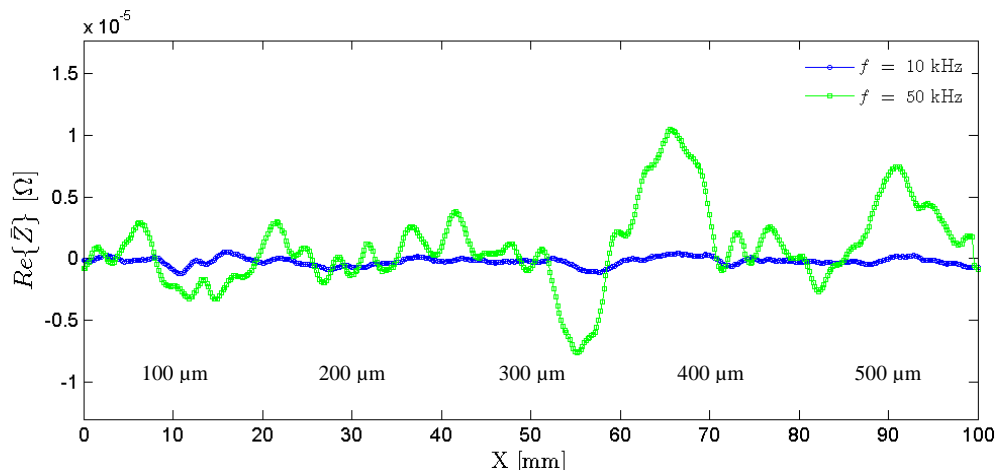


Figura 5.92 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 8, linha 6 ($\varnothing = 3$ mm) @ $f = 10$ e 50 kHz.

5.3.11.9 Resultados na Chapa 9 (Grafite IC5)

Contrariamente às análises anteriores, nos ensaios realizados na chapa 9 as frequências mais elevadas apresentam melhores resultados na detecção dos furos. Os resultados experimentais observados na Figura 5.93 revelam a eficácia da sonda a detectar todos os furos da linha 6 no provete de grafite às frequências, entre 50 e 100 kHz, a frequência de 10 kHz não observa qualquer variação no sinal.

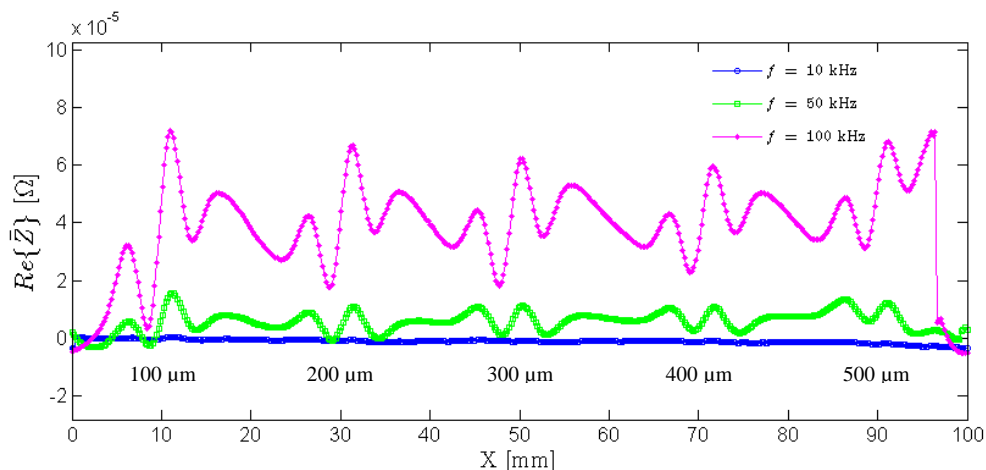


Figura 5.93 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10, 50$ e 100 kHz.

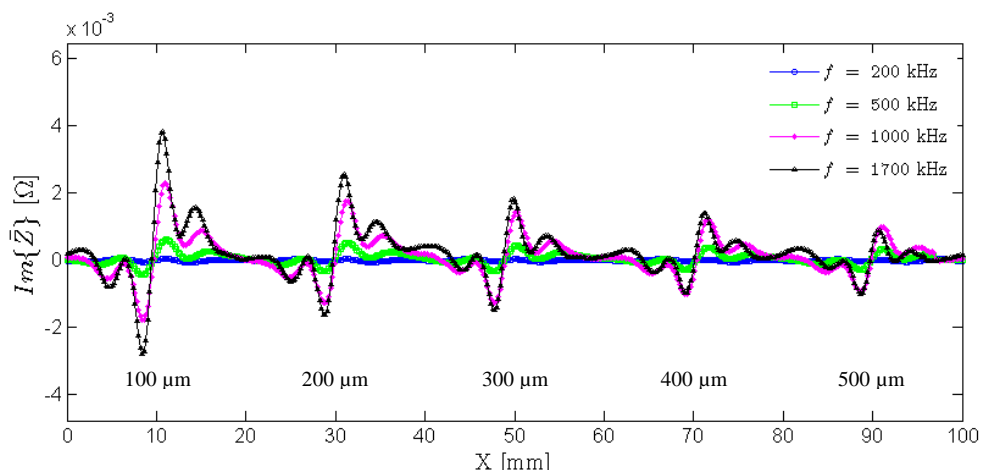


Figura 5.94 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 6 ($\varnothing = 1$ mm) @ $f = 10$ e 25 kHz.

Com o objectivo de evitar a grande contribuição do efeito de bordo no sinal, reduziu-se o número de furos na linha 7 e 8 da chapa 9. Observa-se claramente a presença dos furos até $1500 \mu\text{m}$ para frequências entre 500 e 1700 kHz, na Figura 5.95, na Figura 5.96 referente à linha 8, foram

detectados os furos entre os 1500 e 3000 μm à frequência de 100 kHz, apresentando-se também pra a frequência de 50 kHz uma oscilação na componente $Im(\vec{Z})$ do sinal originada pela presença dos defeitos.

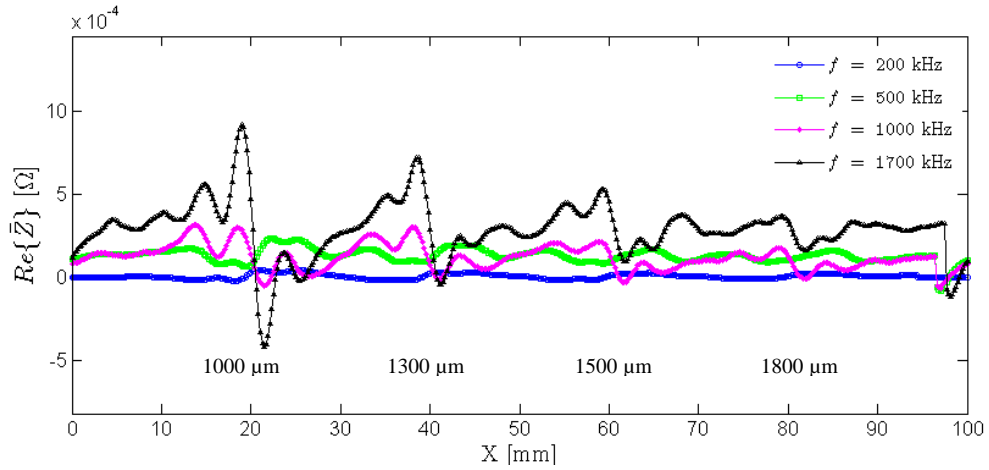


Figura 5.95 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 7 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 200, 500, 1000$ e 1700 kHz .

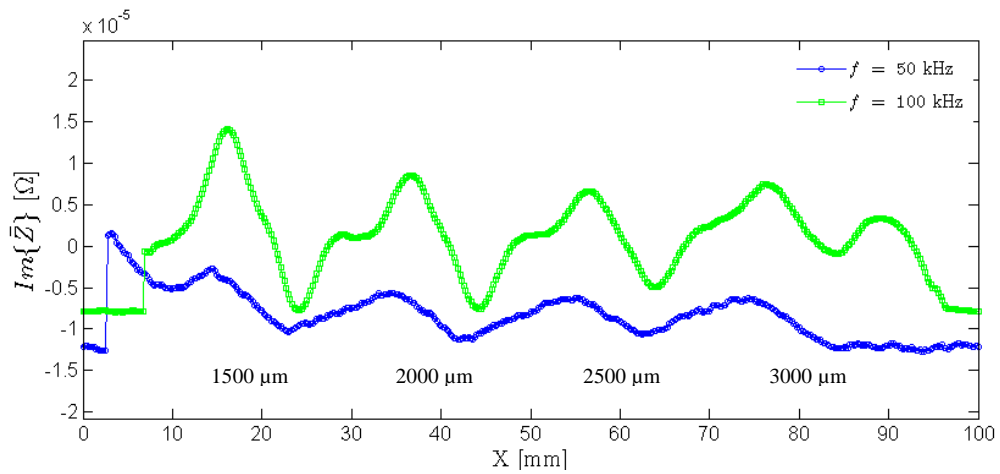


Figura 5.96 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 8 ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) @ $f = 10$ e 25 kHz .

5.3.12 Síntese de Resultados das Inspeções de Base

Apresenta-se neste ponto uma síntese dos resultados obtidos com os trabalhos laboratoriais efectuados. Os resultados encontram-se agrupados em três tabelas:

- Na Tabela 5.1 apresenta-se a profundidade máxima atingida nos ensaios realizados com todas as sondas de CI nos diferentes provetes;
- Na Tabela 5.2 apresenta-se a frequência máxima para a qual foi possível observar, o defeito mais profundo detectado em cada uma das chapas (em correspondência directa com a profundidade apresentada na Tabela 5.1);
- A Tabela 5.3 apresenta o valor máximo da frequência onde é possível detectar-se o defeito localizado a 100 µm da superfície de inspecção.

A observação das tabelas permite uma fácil avaliação e comparação da gama de frequências e da aptidão das diversas sondas na detecção de defeitos nos diversos materiais dos provetes. É de salientar que devido ao equipamento electrónico, não foi possível a realização de ensaios com as sondas IOnic #2, #11, #12, #13, #14 a frequências inferiores a 50 kHz e por isso os resultados não são totalmente comparáveis. Células preenchidas com o valor 0 significam que nesses trabalhos laboratoriais não foram detectados quaisquer defeitos.

Tabela 5.1 - Profundidade máxima de furo detectada

		<i>Pencil Probe</i> [µm]	Sonda #2 [µm]	Sonda #11 [µm]	Sonda #12 [µm]	Sonda #13 [µm]	Sonda #14 [µm]	Sonda AB4 [µm]	Sonda <i>IOnic</i> com bobina [µm]
Chapa 1 (Al 1100)	L6	400	0	400	500	200	200	200	500
	L7	500	400	400	400	400	400	300	500
	L8	500	300	500	200	400	400	200	500
Chapa 2 (Al 5083-H12)		500	400	1300	500	500	400	300	1800
Chapa 3 (Al 6061-T6)		300	200	500	200	300	300	100	1300
Chapa 4 (AISI 1012/15)		0	0	0	0	0	0	0	0
Chapa 5 (Cobre)		100	0	100	0	0	0	0	300
Chapa 6 (GLARE®)		400*	400*	0	0	0	0	0	1320**
Chapa 7 (AISI 304)		0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	500
Chapa 8 (GG 25)		300	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0
Chapa 9 (Grafite IC5)		500	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	3000

N/A – Não avaliado; * Espessura de uma lâmina de alumínio; ** Espessura de duas lâminas de alumínio e uma camada de compósito.

Tabela 5.2 – Última frequência para a profundidade máxima

		<i>Pencil Probe</i> [kHz]	Sonda #2 [kHz]	Sonda #11 [kHz]	Sonda #12 [kHz]	Sonda #13 [kHz]	Sonda #14 [kHz]	Sonda AB4 [kHz]	Sonda <i>IOmic</i> com bobina [kHz]
Chapa 1 (Al 1100)	L6	50	0	50	50	500	1000	1000	25
	L7	25	100	100	100	100	200	200	50
	L8	25	200	50	1000	50	50	200	50
Chapa 2 (Al 5083-H12)		50	200	50	100	200	500	100	10
Chapa 3 (Al 6061-T6)		50	50	50	100	50	100	200	10
Chapa 4 (AISI 1012/15)		0	0	0	0	0	0	0	0
Chapa 5 (Cobre)		50	0	50	0	0	0	0	10
Chapa 6 (GLARE®)		100	50	0	0	0	0	0	25
Chapa 7 (AISI 304)		0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100
Chapa 8 (GG 25)		10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0
Chapa 9 (Grafite IC5)		5000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100

N/A – Não avaliado.

Tabela 5.3 – Última frequência para furo de 100 µm

		<i>Pencil Probe</i> [kHz]	Sonda #2 [kHz]	Sonda #11 [kHz]	Sonda #12 [kHz]	Sonda #13 [kHz]	Sonda #14 [kHz]	Sonda AB4 [kHz]	Sonda <i>IOmic</i> com bobina [kHz]
Chapa 1 (Al 1100)	L6	1000	0	1000	1000	1000	1000	1000	50
	L7	2000	1000	1000	1000	1000	1000	200	50
	L8	2000	1000	500	1000	1000	1000	200	50
Chapa 2 (Al 5083-H12)		100	500	500	500	500	1000	1000	50
Chapa 3 (Al 6061-T6)		100	50	200	200	200	200	200	25
Chapa 4 (AISI 1012/15)		0	0	0	0	0	0	0	0
Chapa 5 (Cobre)		50	0	50	0	0	0	0	25
Chapa 6 (GLARE®)		100	50	0	0	0	0	0	25
Chapa 7 (AISI 304)		0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100
Chapa 8 (GG 25)		10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0
Chapa 9 (Grafite IC5)		12000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1700

N/A – Não avaliado.

5.4 Comparação entre a Sonda *IONic* com uma e duas camadas de Bobinas Sensíveis

A influência do número de camadas de bobinas sensíveis da sonda *IONic* no sinal de saída, realizou-se a comparação entre o sinal da sonda #13 e a sonda #15 à frequência de 50 kHz, os resultados são apresentados na Figura 5.97. A componente real ($Re(\vec{Z})$) do valor da impedância lido aos terminais das bobinas sensíveis. Os resultados dos ensaios realizados demonstram que na sonda #15 constituída por duas camadas de bobinas a variação da amplitude é aproximadamente duas vezes maior que a observada nas inspecções com a sonda #13 de bobina única. Este resultado é interessante pois mostra que o sinal das bobinas sensíveis se soma, ou seja, um crescimento da sonda na vertical, aumentando o número de bobinas sensíveis, apresenta uma amplificação no sinal o que origina maior amplitude no sinal de saída.

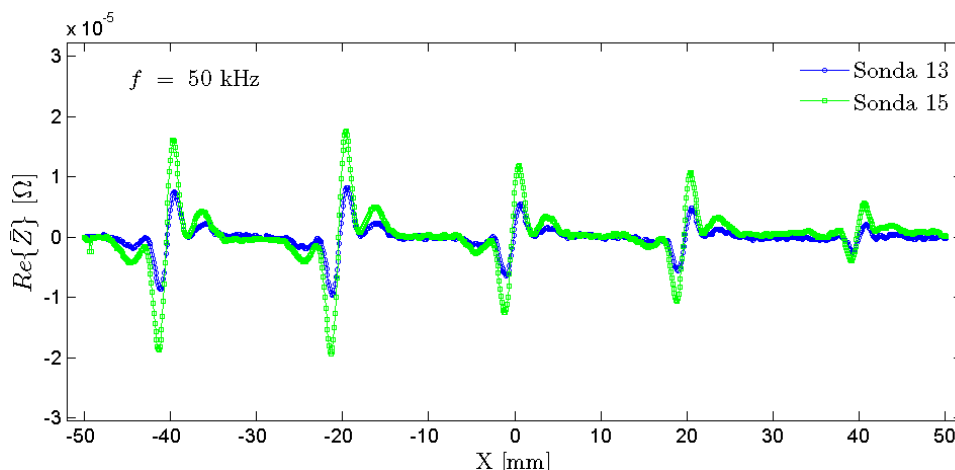


Figura 5.97 - Comparação entre o sinal das sondas *IONic* #13 e #15 (uma e duas camadas de bobinas sensíveis, respectivamente).

5.5 Resultados para Defeitos Paralelos

5.5.1 Resultados Pencil Probe

Os gráficos da Figura 5.98 e Figura 5.99 apresentam os resultados dos ensaios sobre defeitos paralelos, não se apresentam resultados relativos ao bloco 1, pois dos varrimentos efectuados, não resultou nenhum resultado relevante.

Da análise gráfica da Figura 5.98 percebe-se que a sonda *Pencil Probe* não detectou o defeito do Bloco 2 em nenhuma das frequências de inspecção. No gráfico da Figura 5.99 é possível identificar o defeito presente no Bloco 3 em $X = 25$ mm na linha 1 (400 μ m), linha 2 (700 μ m) e linha 3 (1100 μ m), a linha 4 apresenta apenas uma pequena perturbação do sinal na localização do defeito. Realizou-se o estudo que permite perceber qual a frequência máxima de detectabilidade do defeito para as restantes linhas e também qual a variação do sinal com o aumento da frequência na linha 1, este estudo encontra-se no anexo A5.

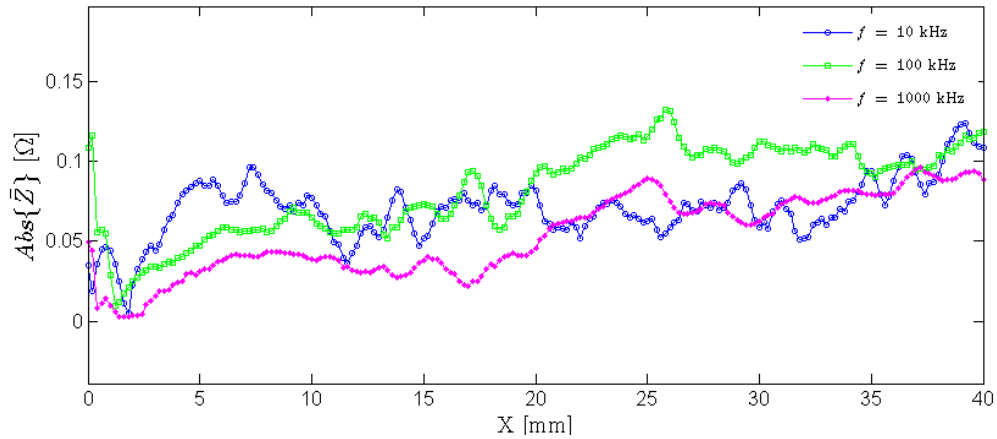


Figura 5.98 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 10, 100$ e 1000 kHz.

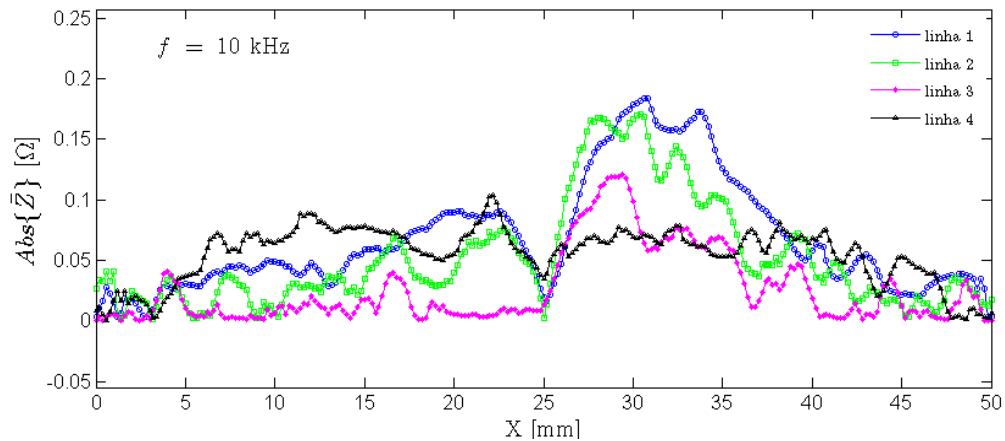


Figura 5.99 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1, 2, 3 e 4 @ $f = 10$ kHz.

5.5.2 Resultados Sonda #11

O gráfico apresentado na Figura 5.100, demonstra a incapacidade da sonda em detectar o defeito presente no bloco 2. Nos resultados relativos ao bloco 3 (Figura 5.101), observa-se que para a frequência de 50 kHz uma perturbação no sinal nas linhas 3 e 4, a linha 5 já não apresenta qualquer sinal do defeito. À frequência de 100 kHz também é possível observar a presença do defeito, o gráfico relativo a esta frequência encontra-se no anexo A5.

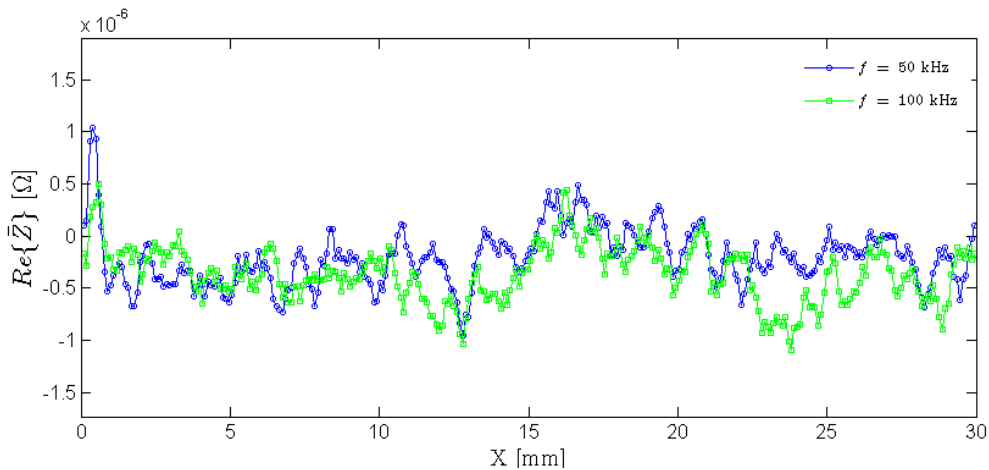


Figura 5.100 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 50$ e 100 kHz .

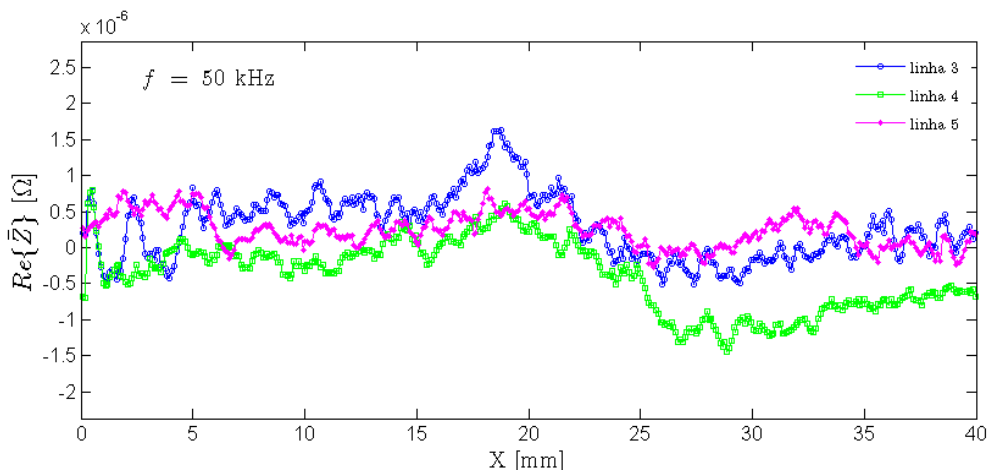


Figura 5.101 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 3, 4 e 5 @ $f = 50 \text{ kHz}$.

5.5.3 Resultados Sonda #12

Os resultados das inspeções da sonda #12 no bloco 2 não revelam qualquer sinal da presença de um defeito (Figura 5.102), relativamente ao bloco 3 (Figura 5.103) foi possível detectar a presença do defeito ate aos 1850 μm (linha 5) à frequência de 100 kHz.

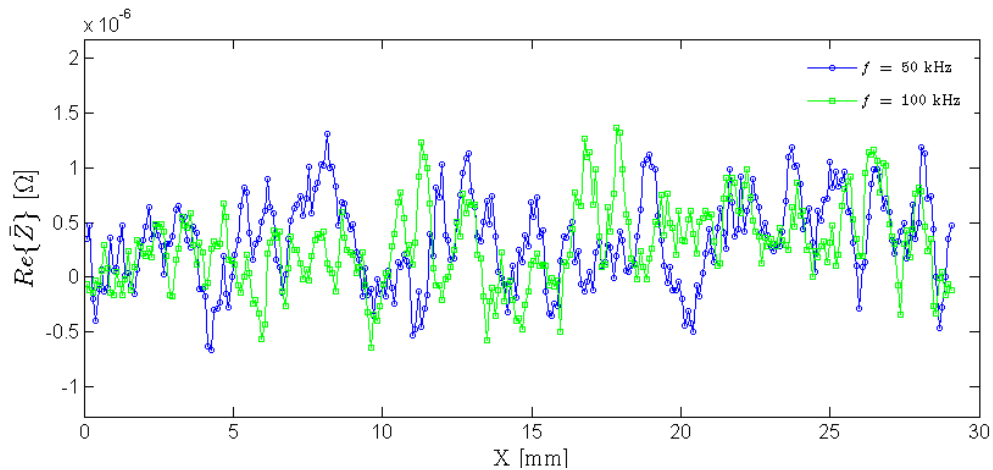


Figura 5.102 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #12 sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 50$ e 100 kHz.

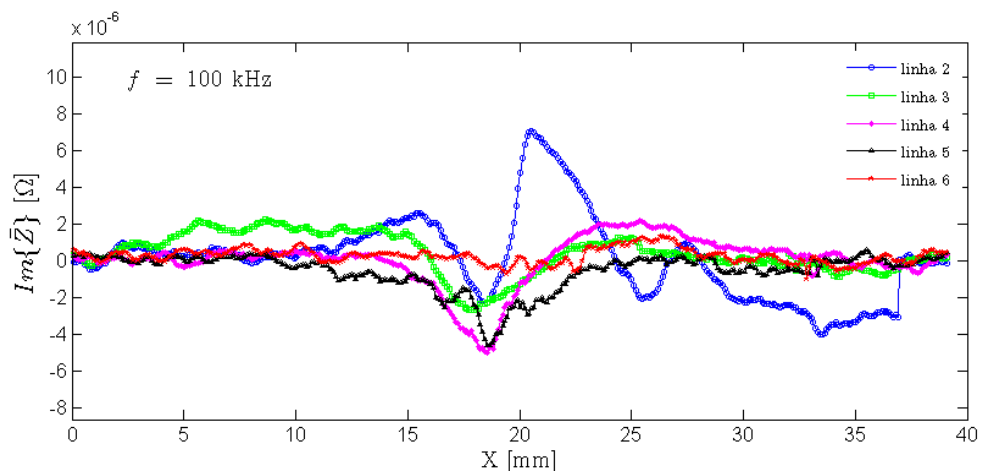


Figura 5.103 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #12 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, 5 e 6 @ $f = 100$ kHz.

5.5.4 Resultados Sonda AB4

Dos sinais obtidos nas inspeções no bloco 2 (Figura 5.104) não se identifica qualquer perturbação no sinal que represente a presença do defeito. Por outro lado no bloco 3 observa-se em $X = 20$ mm uma perturbação no sinal que permite perceber-se a presença do defeito até aos 1850 μm de profundidade (linha 5). Apresentam-se no anexo A5 os resultados onde se observa que, à frequência de 100 kHz a profundidade máxima a que é possível detectar um defeito são 700 μm .

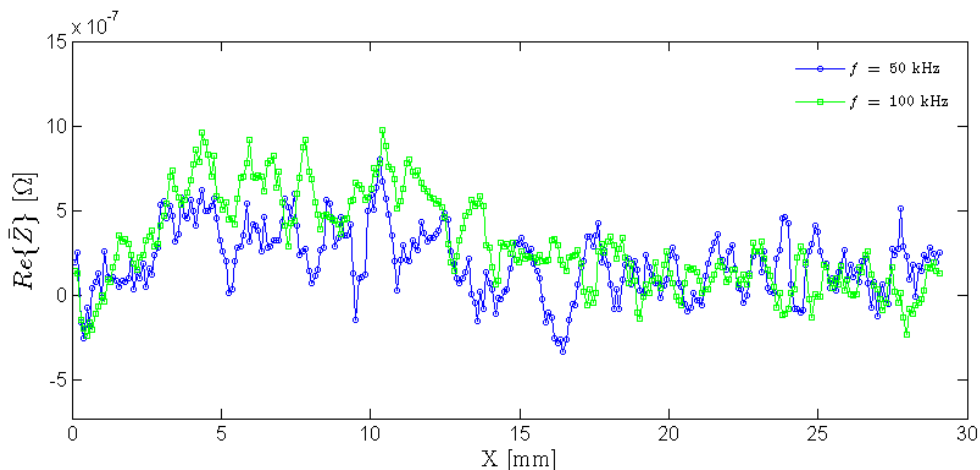


Figura 5.104 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 50$ e 100 kHz.

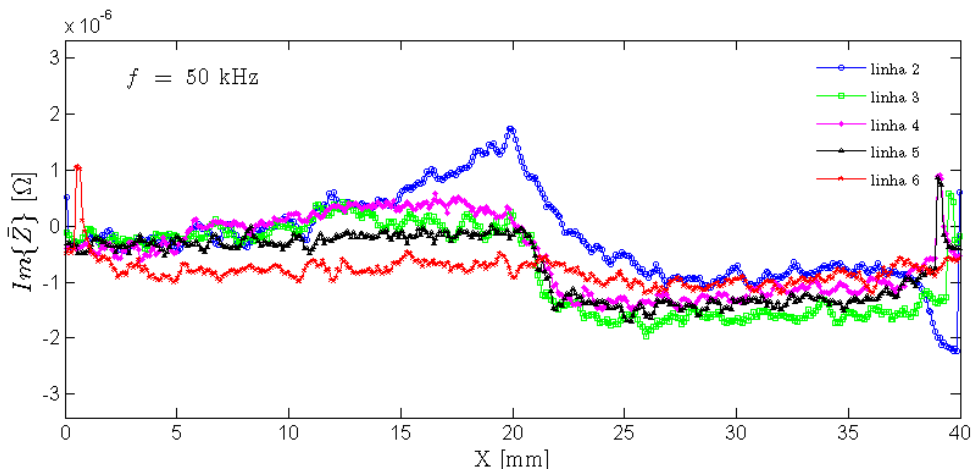


Figura 5.105 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, 5 e 6 @ $f = 50$ kHz.

5.5.5 Resultados *IONic* Bobina

No gráfico apresentado na Figura 5.106 observa-se a capacidade da sonda em detectar o defeito presente no bloco 1, na inspeção realizada no lado A, em que o defeito se encontra 7.4 mm da superfície, à frequência de 10 kHz. O varrimento efectuado no lado B no qual a altura entre a superfície de inspeção e o defeito é 50 μm maior que no lado A, a presença do defeito não foi detectada.

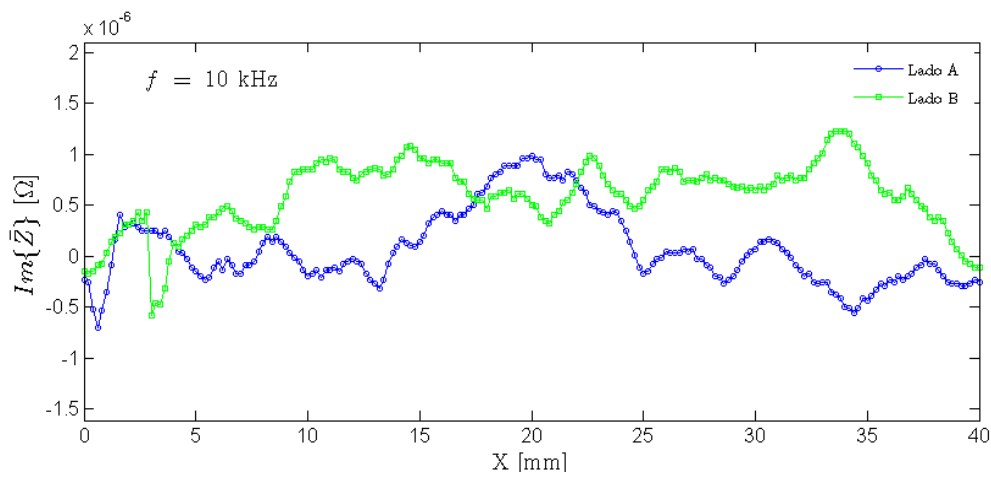


Figura 5.106 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 1, @ $f = 10 \text{ kHz}$.

O sinal da sonda para a inspeção do bloco 2 é apresentado no gráfico da Figura 5.107, da análise gráfica é possível observar uma variação no sinal, na zona de entrada no defeito ($X = 15 \text{ mm}$), sendo essa variação da ordem de gradeza do ruído, não é possível afirmar-se com certeza se o sinal é devido à presença do defeito.

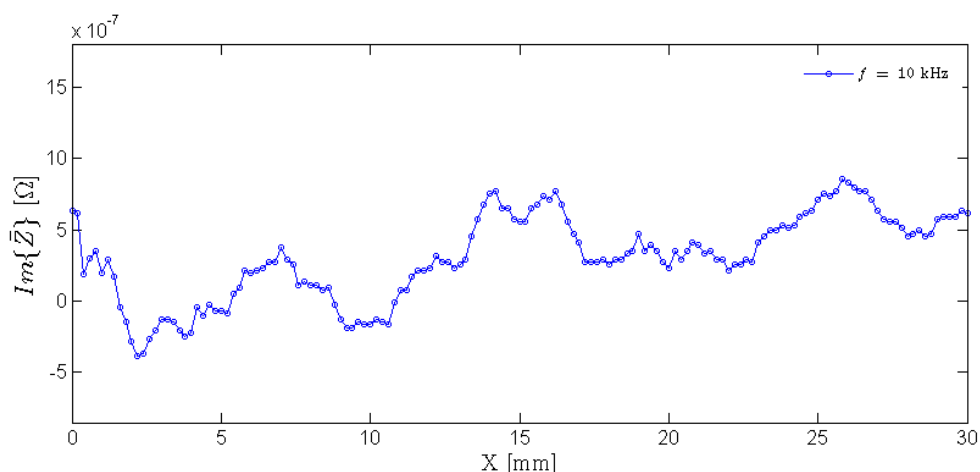


Figura 5.107 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 2 @ $f = 10$ kHz.

Na Figura 5.108, apresenta-se a componente $Im(\vec{Z})$ do sinal obtido nos ensaios ao bloco 3 à frequência de 10 kHz, tendo sido detectada a presença do defeito até à linha 9, localizada a 3600 μm da superfície do bloco.

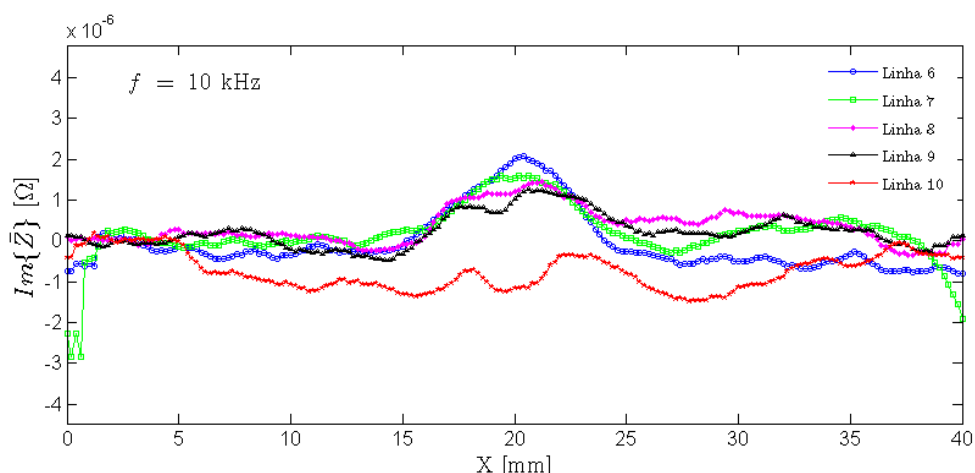


Figura 5.108 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 6, 7, 8, 9 e 10 @ $f = 10$ kHz.

5.6 Aplicação da Sonda *IONic* à SFL em Ligas AlMgSc

No âmbito deste trabalho, avaliou-se a capacidade do equipamento *IONic* na caracterização micro-defeitos subsuperficiais numa liga AlMgSc processada por SFL, muito utilizada actualmente na indústria aeronáutica. Inspeccionaram-se os provetes utilizando uma sonda convencional de CI, P/500kHz-1MHz/A/90.5/6 e o equipamento de END Nortec 500, na face onde está localizada a

raiz do cordão e perpendicularmente ao mesmo. Os provetes processados por SFL originaram defeitos na raiz do cordão de soldadura, do tipo *Lack of Penetration* (LOP), com tamanhos que variaram entre os 0 e os 390 μm de profundidade. Na Figura 2.5 podem ser vistas macrografias correspondentes ao cordão de SFL nos casos de defeito mínimo e máximo na Figura 2.5 a) e Figura 2.5 b), respectivamente.

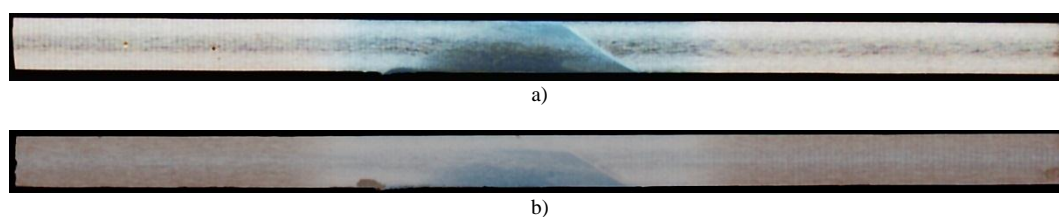


Figura 5.109 - a) Macrografia da chapa da liga AlMgSc sem defeito (0 μm); b) Macrografia da chapa da liga AlMgSc com defeito de 390 μm .

Apresenta-se na Figura 5.110 o resultado obtido à frequência de 500 kHz com a sonda de CI convencional, para as duas chapas. O sinal apresenta o perfil da impedância eléctrica ($Abs(\vec{Z})$) ao longo da chapa sendo este directamente proporcional a variação condutividade eléctrica do material.

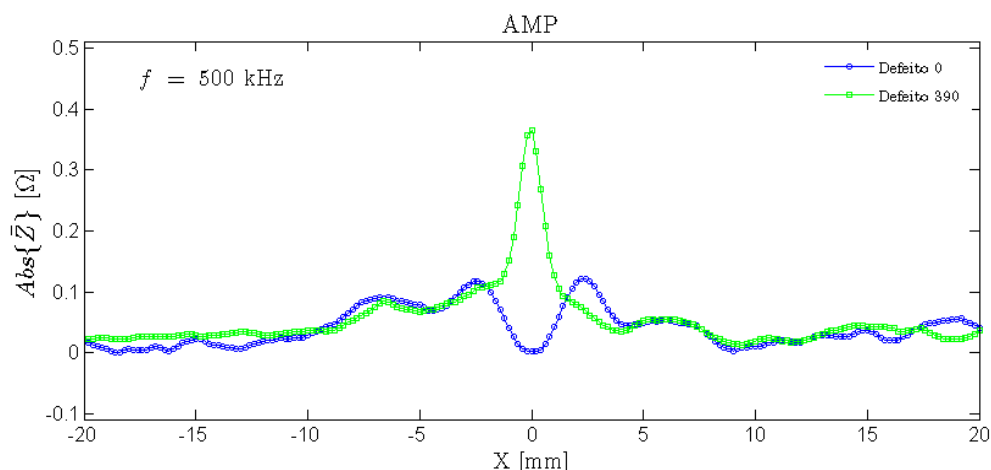


Figura 5.110 – Resultados da sonda convencional de CI nas duas chapas.

Dos resultados obtidos com a sonda convencional é apenas perceptível o aumento global da condutividade eléctrica (variação de $Abs(\vec{Z})$) devido ao afastamento do nugget em relação a superfície de inspecção. A presença de defeitos não foi detectada, este facto prende-se em grande parte com perfil de condutividade da chapa depois de processada, pois no caso da existência de

um defeito a variação que este causaria, seria da mesma ordem de grandeza da variação da condutividade causada pelo processo de SFL em si.

Observando-se a Figura 5.111, referente às inspecções efectuadas com a sonda *IONic* AB4, identifica-se a presença do defeito de LOP presente na raiz do cordão (representado pela linha tracejada a vermelho). Demonstra-se assim a capacidade das sondas *IONic* na detecção e caracterização de defeitos LOP na liga AlMgSc.

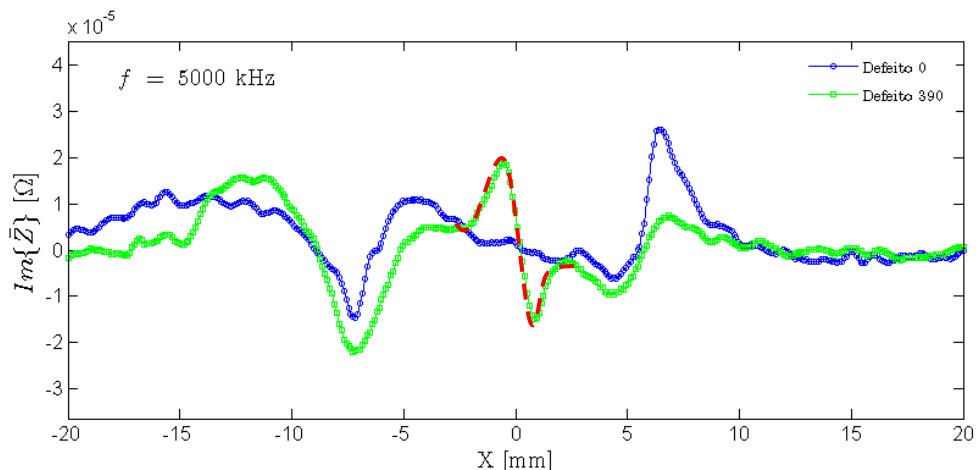


Figura 5.111 - Resultados da sonda *IONic* nas duas chapas.

5.7 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados mais relevantes da aplicação do sistema de END por CI, às três diferentes condições de inspecção criadas, para as sondas anteriormente descritas, efectuados com o auxílio dos dispositivos de locomoção e posicionamento de sondas desenvolvidos no âmbito deste trabalho.

Os ensaios realizados em juntas bimetálicas revelaram a eficácia das sondas *IONic* e *Pencil Probe* na detecção da mudança de material. No entanto as sondas *IONic* permitiram ainda ao inspeccionar juntas compostas por materiais com diferentes permeabilidades relativas, distinguir através do sinal resultante qual dos materiais apresenta maior e menor permeabilidade relativa.

A avaliação dos defeitos em profundidade revelou que os sinais procedentes das sondas *IONic* permitem detectar a existência de defeitos nos diferentes materiais e em todos os casos os resultados apresentaram-se tão bons ou melhores que os provenientes das sondas *Pencil Probe*. A

única excepção observou-se na chapa 4 (AISI 1012/15), para a qual não foi possível detectar nenhum dos defeitos existentes no provete.

Avaliou-se também o efeito do *offset* dos furos no sinal das sondas, o que permitiu concluir que as sondas *IOmic* são muito menos afectadas por este efeito, possibilitando a detecção de defeitos a distâncias consideravelmente mais elevadas do centro da sonda, que as sondas *Pencil Probe*.

Os trabalhos laboratoriais realizados para a avaliação de defeitos padrão permitem igualmente perceber a maior capacidade das sondas *IOmic* na detecção desta morfologia de defeitos, apresentando resultados significativamente melhores que os observados com as sondas *Pencil Probe*.

Por último, apresentou-se uma síntese de um estudo realizado no LTI, no âmbito de um projecto onde se avaliou as capacidades dos equipamentos *IOmic* na caracterização de ligas de AlMgSc processadas no estado solido por SFL, utilizadas na indústria aeroespacial.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Introdução

São apresentadas neste capítulo as conclusões relativas ao trabalho realizado e algumas propostas para desenvolvimentos futuros. As conclusões mais relevantes do trabalho estão já implícitas nos comentários aos resultados obtidos e descritas nos comentários dos resultados obtidos e sintetizadas no final de cada capítulo. Neste capítulo pretende-se apenas dar evidência e consolidar as conclusões retiradas da análise dos resultados, de carácter mais abrangente.

Relativamente às propostas para desenvolvimentos futuros apontam-se alguns tópicos que se consideram importantes para dar continuidade ao trabalho desenvolvido no âmbito desta tese e permitam num futuro próximo, a aplicação do sistema de END *IONic* na indústria.

6.2 Conclusões

Os meios de locomoção e inspecção laboratoriais desenvolvidos mostraram resultados que correspondem aos requisitos previamente estabelecidos, nomeadamente no que diz respeito à versatilidade, portabilidade, precisão e rapidez da inspecção. O carácter económico da solução encontrada é igualmente um factor de especial importância

A modelação numérica das sondas *IOmic* com o *software CST Studio Suite* revelou-se uma ferramenta útil para avaliar o comportamento das diferentes geometrias de sonda *IOmic*, nas juntas bimetalicas e nas duas morfologias de defeito, e também um método eficaz para previsão e compreensão de resultados. Os resultados da simulação numérica mostraram-se concordantes com os resultados validados experimentalmente, proporcionando estes um importante termo de comparação.

No que respeita aos resultados para as juntas bimetalicas ficou comprovada a eficácia da sonda *IOmic* na detecção de mudanças de material. Ao longo de uma inspecção sobre diferentes materiais, a sonda *IOmic* permite facilmente na interpretação dos resultados perceber a curva característica resultante entre transição de materiais de permeabilidade eléctrica reduzida para outro de maior permeabilidade eléctrica, e vice-versa. Os melhores resultados na caracterização de juntas bimetalicas foram obtidos com as sondas #2, #11 e #13

No que diz respeito às sondas de CI convencionais, ficou também demonstrada a capacidade na percepção de mudanças de material durante uma inspecção, porem não permite a caracterização dos materiais quanto à variação das condutividades eléctricas.

Os resultados mostram que a sonda *IOmic* apresenta sempre uma sensibilidade tão boa ou melhor que as sondas convencionais na detecção de defeitos em profundidade, em qualquer material, tendo como única excepção os trabalhos realizados na chapa 4 (AISI 1012/15), que em nenhum caso foi possível detectar os furos, devido à necessidade de serem realizadas inspecções utilizando frequências mais baixas. Concluiu-se também que as sondas *IOmic* possibilitam a detecção de defeitos a profundidades superiores à profundidade das correntes induzidas padrão.

As inspecções realizadas com a sonda *IOmic* permitiram detectar com sucesso a presença de furos nos provetes a profundidades bastante elevadas, quando utilizadas baixas frequências de inspecção. Tendo os melhores resultados sido obtidos com a sonda *IOmic* Bobina, devido ao facto de ser a única sonda onde foi possível a inspecção com as frequências entre 10 e 50 kHz. Conseguiu-se com esta sonda detectar defeitos a profundidades consideráveis, na chapa 1 a 500 μm à frequência de 25 e 50 kHz dependendo do diâmetro do furo, chapa 2 a 1800 μm ($f = 10$ kHz), chapa 3 a 1300 μm ($f = 10$ kHz) chapa 5 a 300 μm ($f = 10$ kHz), chapa 6 distingue-

se o 2º furo ($f = 25$ kHz), chapa 7 a $500\text{ }\mu\text{m}$ ($f = 100$ kHz) e na chapa 9 a $3000\text{ }\mu\text{m}$ ($f = 100$ kHz). Apenas nas chapas 4 e 8 não se conseguiu detectar nenhuma das profundidades de defeito.

Comparativamente os resultados provenientes das sondas de CI *Pencil Probe* não apresentaram as mesmas capacidades, sendo que apenas na chapa 8 foram obtidos melhores resultados, nomeadamente $300\text{ }\mu\text{m}$ ($f = 10$ kHz), nas inspecções com a sonda *IONic*, não foi possível observar-se nenhum dos furos existentes na chapa.

Também no estudo realizado de avaliação da variação do sinal da sonda à medida que o centro desta se afasta do centro do furo (*offset*) as sondas *IONic* se revelaram eficazes, detectando a presença do defeito quando este se encontra a até 4 mm de distância do eixo de simetria, relativamente às convencionais *Pencil Probe*, quando o defeito se encontrava a distâncias superiores a 2 mm do centro da bobina, o sinal deixa de apresentar qualquer perturbação.

Do estudo da influência do número de camadas de bobinas sensíveis conclui-se que, o aumento de número de bobinas aumenta a amplitude do sinal do defeito lido aos terminais da sonda, melhorando os resultados e facilitando a detecção dos defeitos por parte do utilizador.

Das inspecções realizadas a defeitos paralelos com as sondas *IONic*, em especial com a sonda *IONic* Bobina, que detectou a existência do defeito do bloco 1 a $7400\text{ }\mu\text{m}$ de profundidade à frequência de 10 kHz. A sonda convencional não mostrou qualquer característica no sinal que permita identificar o mesmo defeito. O bloco 2 apresenta um defeito teoricamente sem espessura e a uma profundidade considerável pelo que de nenhum dos métodos avaliados originou resultados que permitissem a identificação da presença de defeitos. Foi possível distinguir a presença de defeitos no bloco 3 tanto na sonda *IONic*, como também através do método convencional de CI, embora mais uma vez a sonda *IONic* tenha demonstrado melhores performances na detecção de defeitos deste tipo, nomeadamente com os resultados da sonda *IONic* com bobina, que mostraram a presença de defeito até à linha 10 ($4000\text{ }\mu\text{m}$), significativamente melhor que os $1100\text{ }\mu\text{m}$ detectados através do método convencional na linha 3.

6.3 Propostas Para Desenvolvimentos Futuros

Um aspecto fundamental para aprofundar o estudo realizado neste trabalho passaria por uma optimização do *hardware*, para aumentar a gama de frequências de inspecção possibilitando dessa maneira a realização de inspecções a frequências inferiores a 50 kHz, pois foi nesta gama que se conseguiram os melhores resultados.

Alargar o estudo a outros materiais de engenharia que não foram contemplados neste estudo, nomeadamente ligas de magnésio, titânio e Inconel. Assim como, procurar aumentar a capacidade de detecção de defeitos em profundidade nos materiais ferrosos, pois foram estes os que revelaram piores resultados nesta tese.

A produção de sondas *IONic* com uma configuração matricial traduzir-se-ia em uma maior velocidade de inspecção de provetes com grandes áreas de superfície e numa diminuição significativa do número necessário de varrimentos necessários para cobrir toda a área a inspecionar. Um bom exemplo da aplicação desta variante de sonda *IONic* seria a realização de inspecções como as efectuadas nas chapas da liga AlMgSc, que devido ao seu tamanho demoraram um tempo considerável a serem efectuadas.

Também ao nível dos meios de locomoção surgem algumas propostas para novos desenvolvimentos, nomeadamente a produção de um dispositivo em que o movimento entre a sonda e o provete é executado movimentando-se o provete e não a sonda. Um dispositivo deste tipo poderia não só originar uma diminuição no valor do ruído devido a interferências provenientes da movimentação da sonda e dos cabos, como também diminuir o *lift-off* da sonda.

A comparação entre as sondas de uma e duas camadas que demonstraram uma melhoria significativa da amplitude do sinal, pode também ser alvo de testes mais aprofundados em diferentes morfologias de defeitos e materiais para determinar se o aumento de amplitude se traduz em uma maior profundidade de penetração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Santos e P. Vilaça, “New NDT eddy current Probe”. Portugal Patente 103854, 19 10 2007.
- [2] T. Santos, P. Vilaça e M. Piedade, “A new method based on Eddy current Probe variant”. Portugal Patente 104089, 9 6 2008.
- [3] T. Santos, “Ensaaios Não Destrutivos por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear,” Tese de Doutoramento, IST, UTL, Lisboa, Julho de 2009.
- [4] P. E. Mix, “INTRODUCTION TO NONDESTRUCTIVE TESTING,” John Wiley & Sons, Inc, Second Edition, A Training Guide, 2005, pp. 65-95.
- [5] “Olympus,” Corporation, Olympus, [Online]. Available: <http://www.olympus-ims.com/pt/>. [Acedido em Junho 2012].
- [6] “NDT Resource Center,” [Online]. Available: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Introduction/IntroductiontoET.htm>. [Acedido em Junho 2012].
- [7] N. J. Goldfine, A. P. Washabangh, Karen E. Walrath, Ian C. Shay, David C. Grundy e Mark Windoloski Darrell E. Schlicker, “EDDY CURRENT SENSOR ARRAY HAVING DRIVE WINDINGS WITH EXTENDED PORTIONS,” n.º 2004/0232911 A1, 23 Junho, 2004.
- [8] L. Rosado, T. Santos, M. Piedade, P. Ramos e P. Vilaça, “New Non Destructive Test technique on Metal Inspection,” *IMEKO 2009 - Fundamental and Applied Metrology*, vol. 09, pp. 443 - 448, 2009.
- [9] “A new NDT System for Micro Imperfections Detectio-Application to FSW and FSpW,” *Weld World*, vol. 53, p. Special Issue, 2009.
- [10] “Application of eddy current techniques to inspect friction spot welds in aluminum alloy 2024 and a composite material,” *Weld World*, vol. 55, pp. 9,10, 2011.
- [11] J. G. F. C. Gonzalez, *Desenvolvimento e Aplicação de*, Lisboa: Tese de Mestrado - FCT, UNL, 2011.

- [12] L. S. Rosado, M. Piedade, P. M. Ramos, T. G. Santos e P. Vilaça, “A Reconfigurable Digital Signal Processing System for Eddy Currents Non-Destructive Testing,” 3-6 May 2010, ISSN: 1091-5281, pp. 1284 – 1289, DOI: 10.1109/IMTC.2010.5488183.
- [13] L. Rosado, *Non-Destructive Testing based on Eddy Currents: Detector de falhas em soldadura*, Lisboa: Tese de Mestrado - IST, UTL, 2009.
- [14] J. Faria, *Aplicação de ensaios não destrutivos por correntes induzidas à caracterização de propriedades eléctricas de materiais processados no estado sólido.*, lisboa: Tese de Mestrado - FCT, UNL, 2010.
- [15] N. T. M. P. a. A. F. David Lammlein, “Defect Significance and Detection in Aluminum Friction Stir Welds: A Literature Search,” Technical Report, NSWCCD-61-TR-2011/20, , Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, West Bethesda, MD 20817-5700, November 2011.
- [16] “MatWeb,” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/>. [Acedido em Agosto 2012].

ANEXOS

A1 - Desenhos Técnicos dos Componentes do Suporte de Sondas

A1.1 Travão do Guia Linear

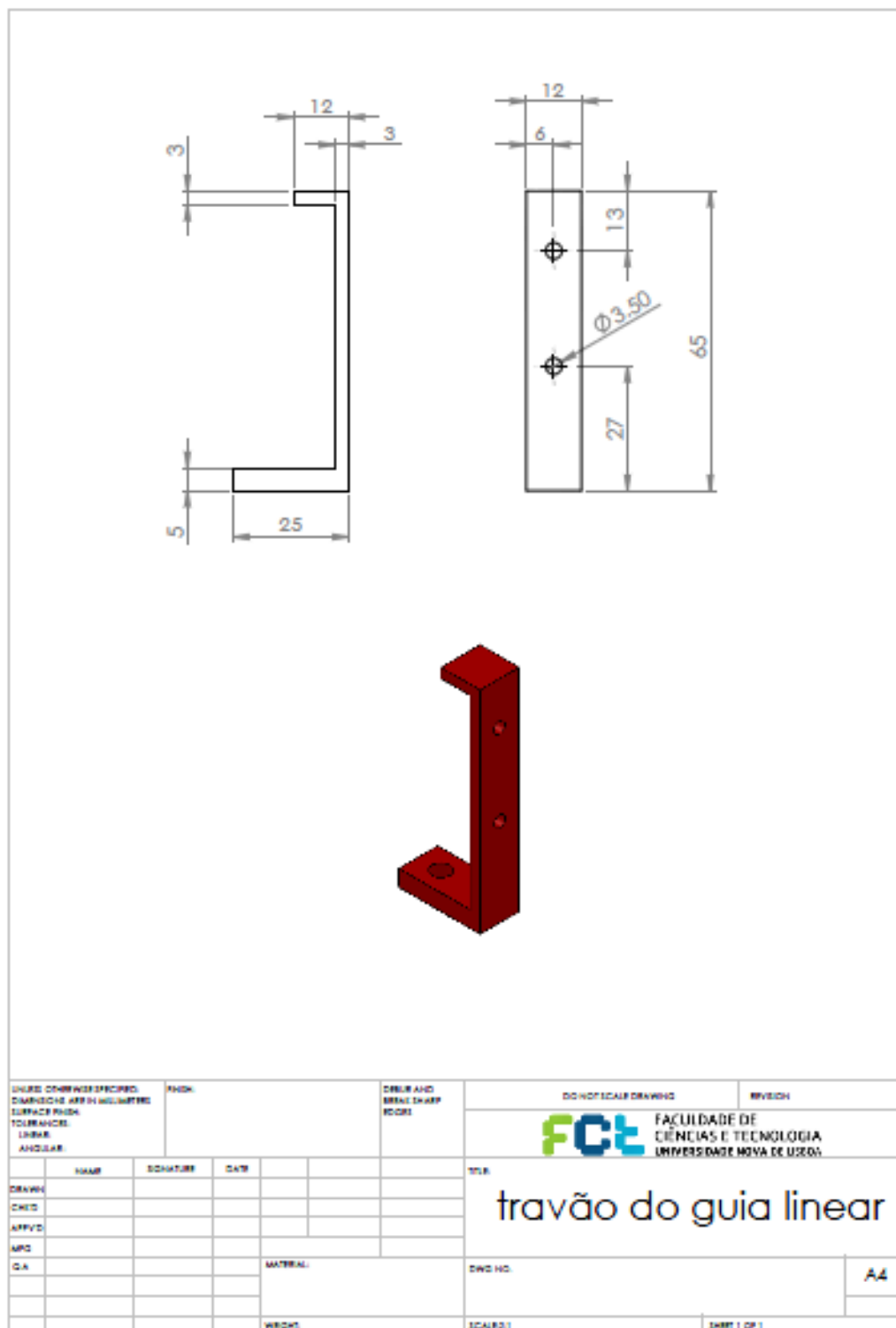


Figura A 1 – Desenho técnico do travão do guia linear.

A1.2 Base de Suporte

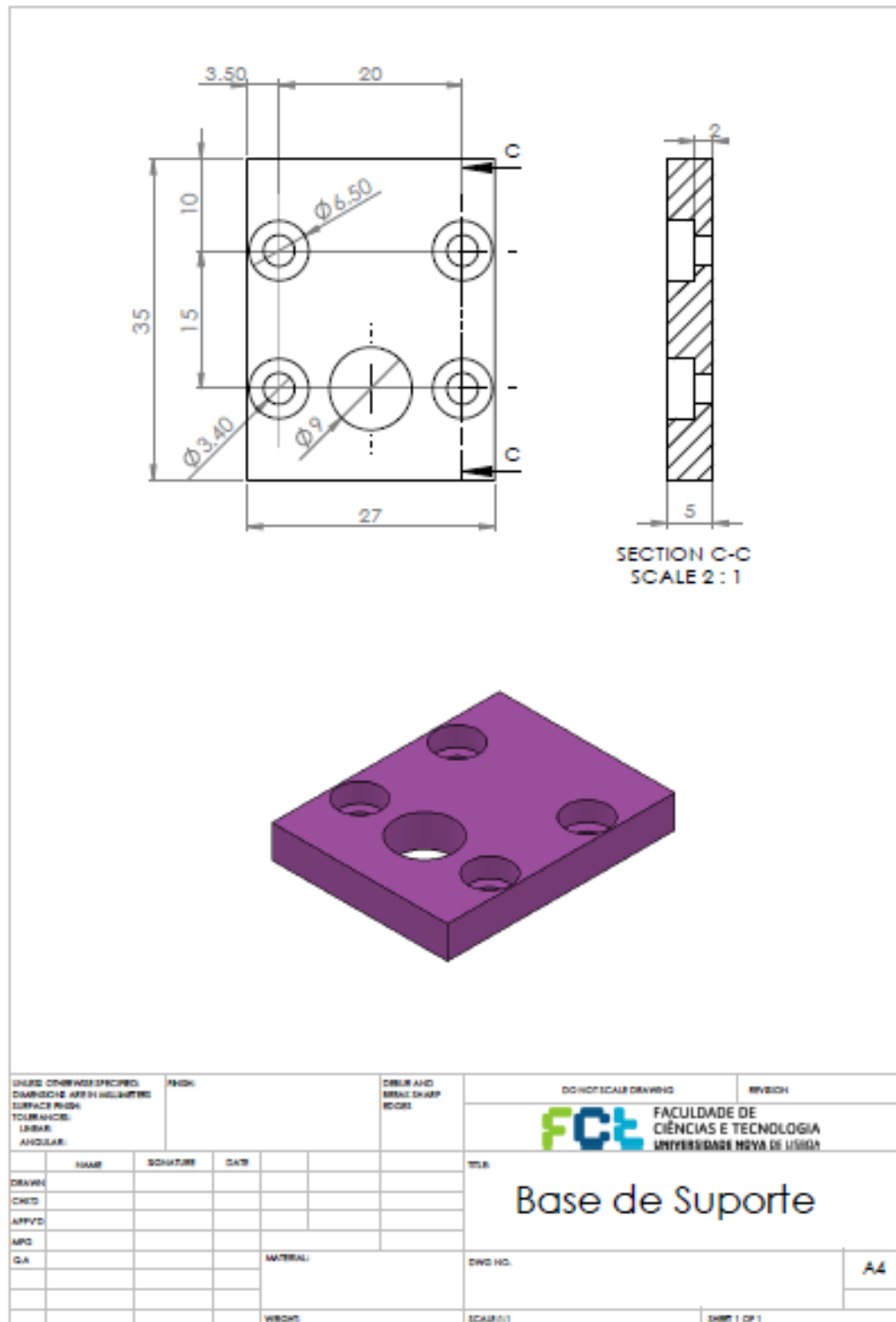


Figura A 2 - Desenho técnico da base de suporte.

A1.3 Garfo

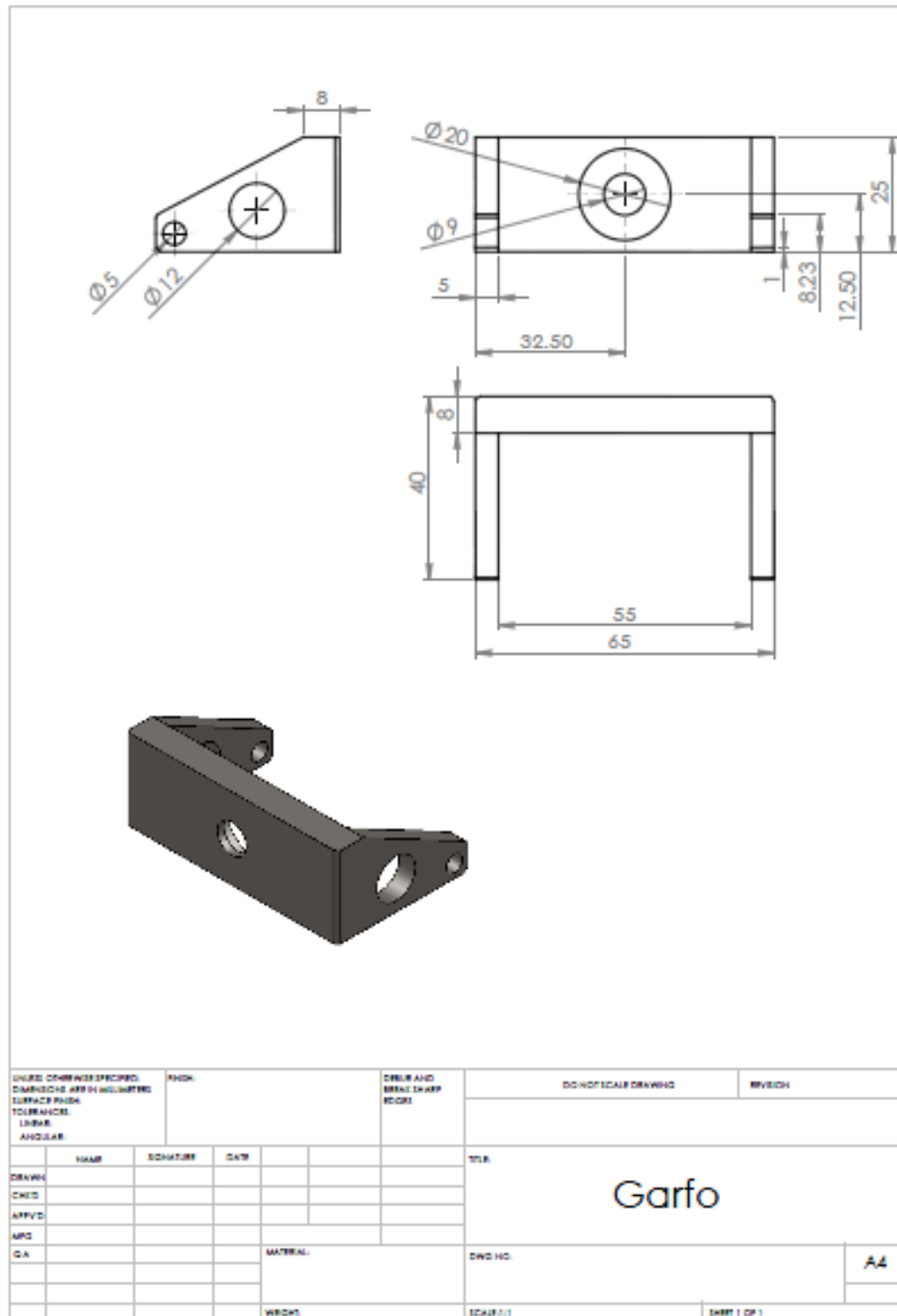


Figura A 3 - Desenho técnico do garfo.

A1.4 Bloco para Rolamentos

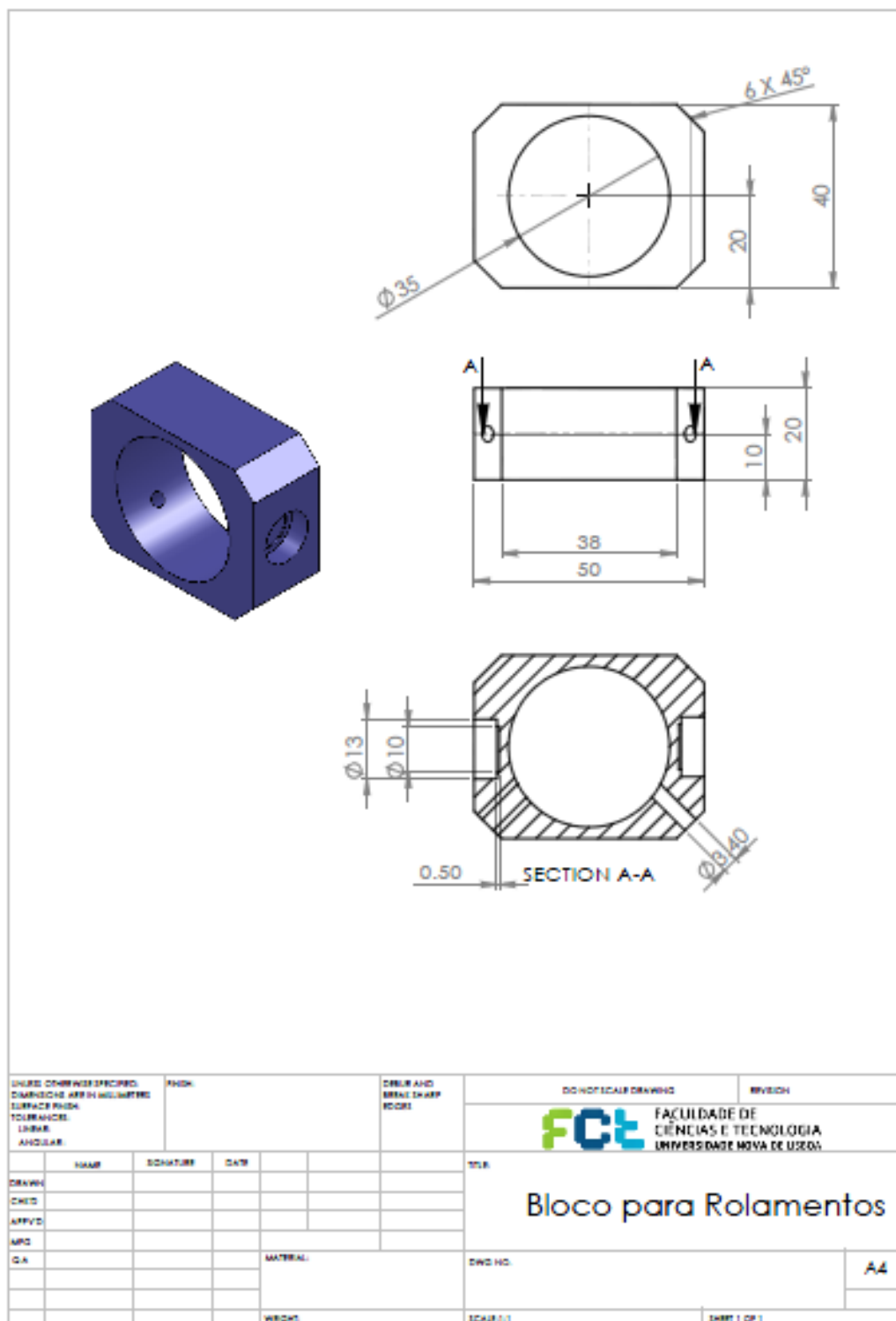


Figura A 4 - Desenho técnico do bloco para rolamentos.

A1.5 Copo

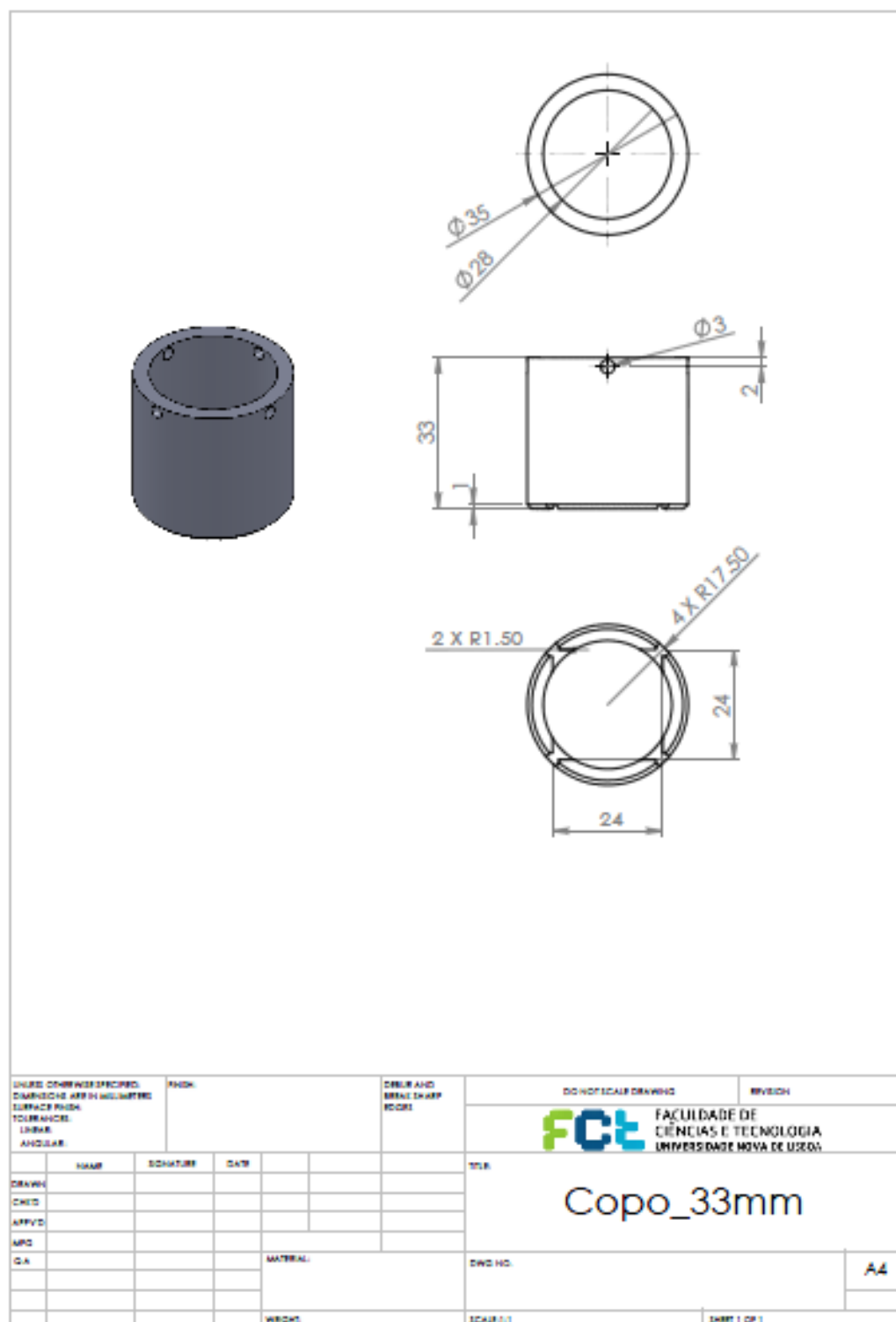


Figura A 5 - Desenho técnico do copo.

A1.6 Tampa

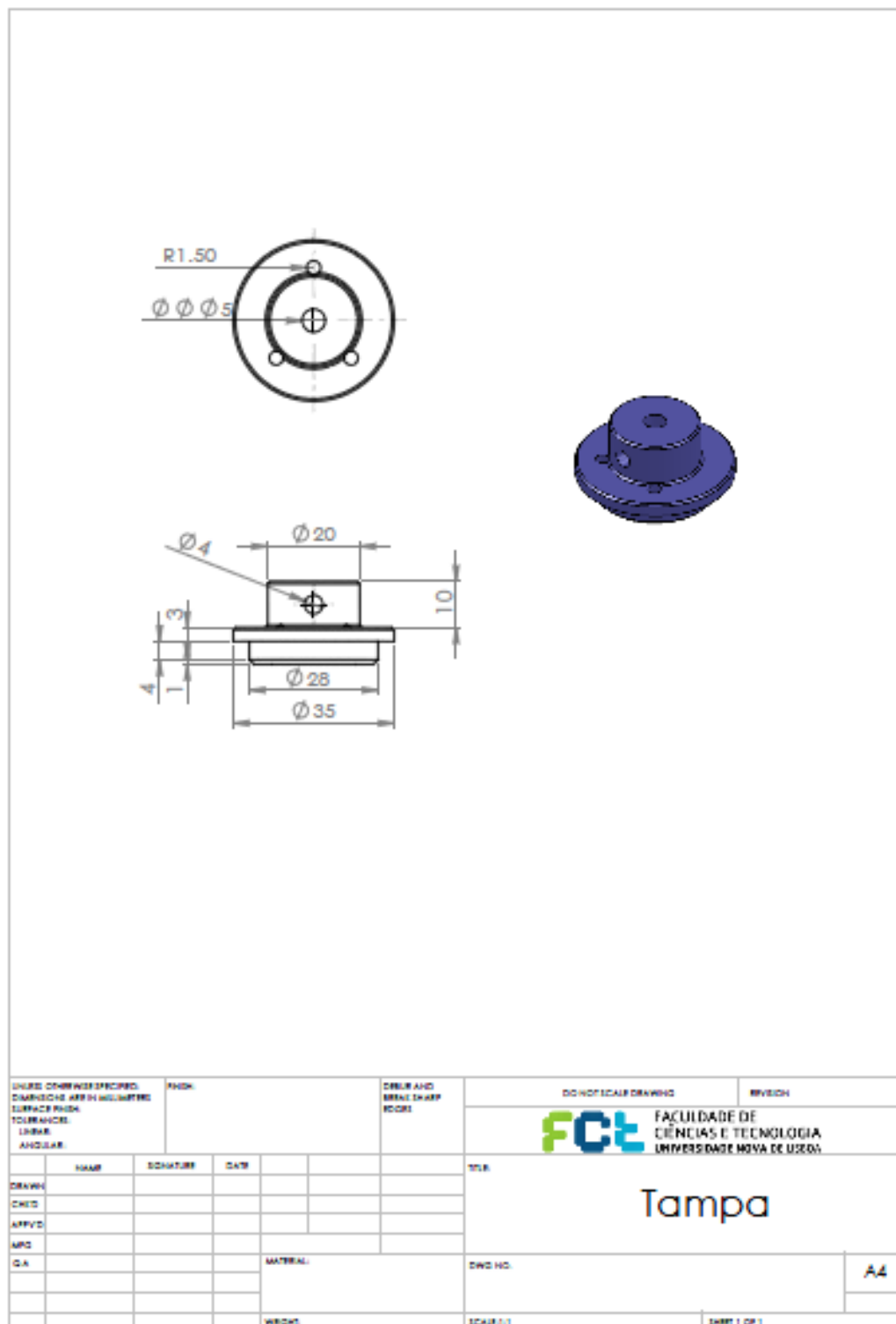


Figura A 6 - Desenho técnico da tampa.

A2 - Desenhos Técnicos dos Componentes da Mesa Delta

A2.1 Apoio da Correia

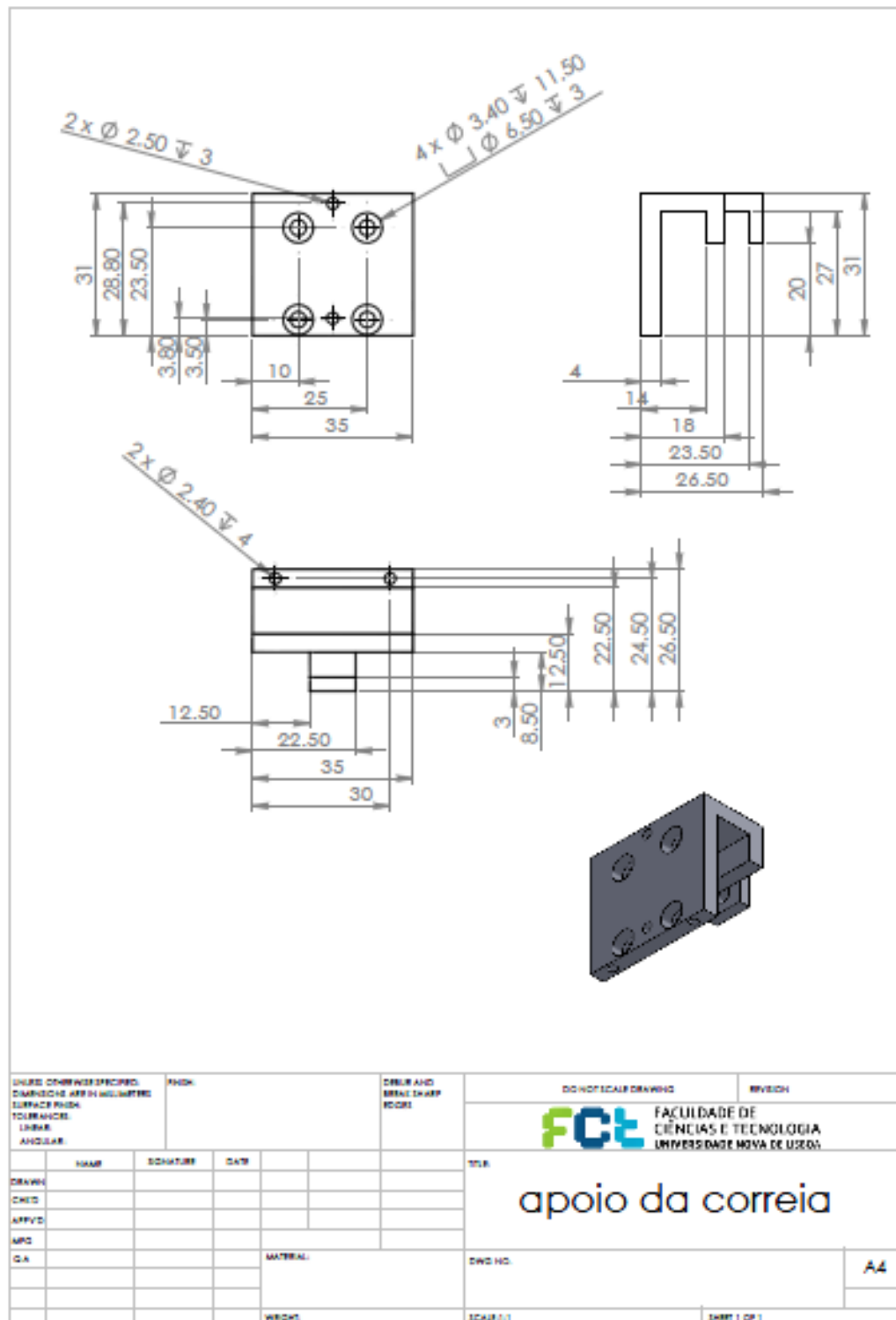


Figura A 7 - Desenho técnico do apoio da correia.

A2.2 Apoio do Encoder

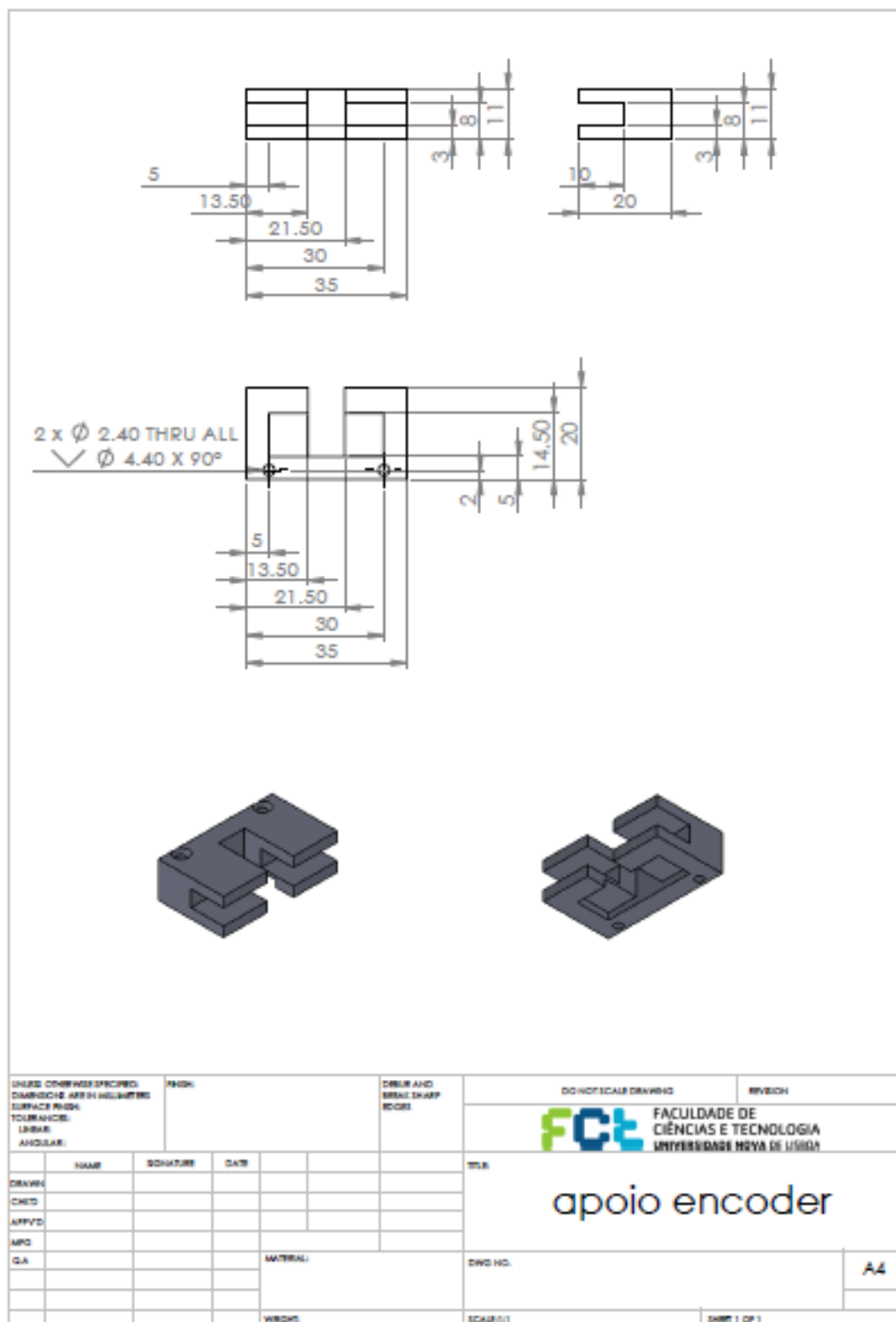


Figura A 8 - Desenho técnico do apoio do encoder.

A2.3 Base

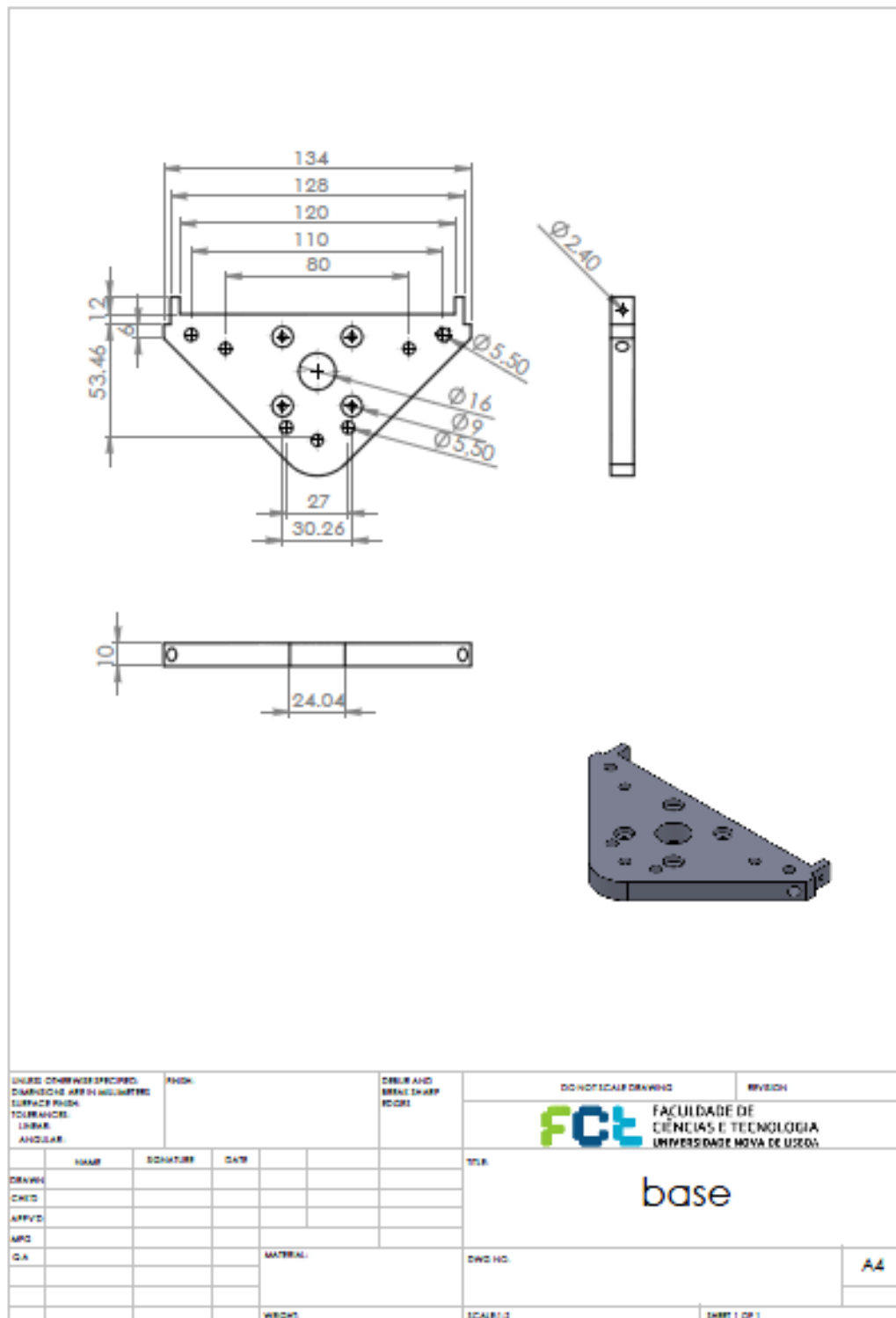


Figura A 9 - Desenho técnico da base.

A2.4 Fixador Fita Esquerdo

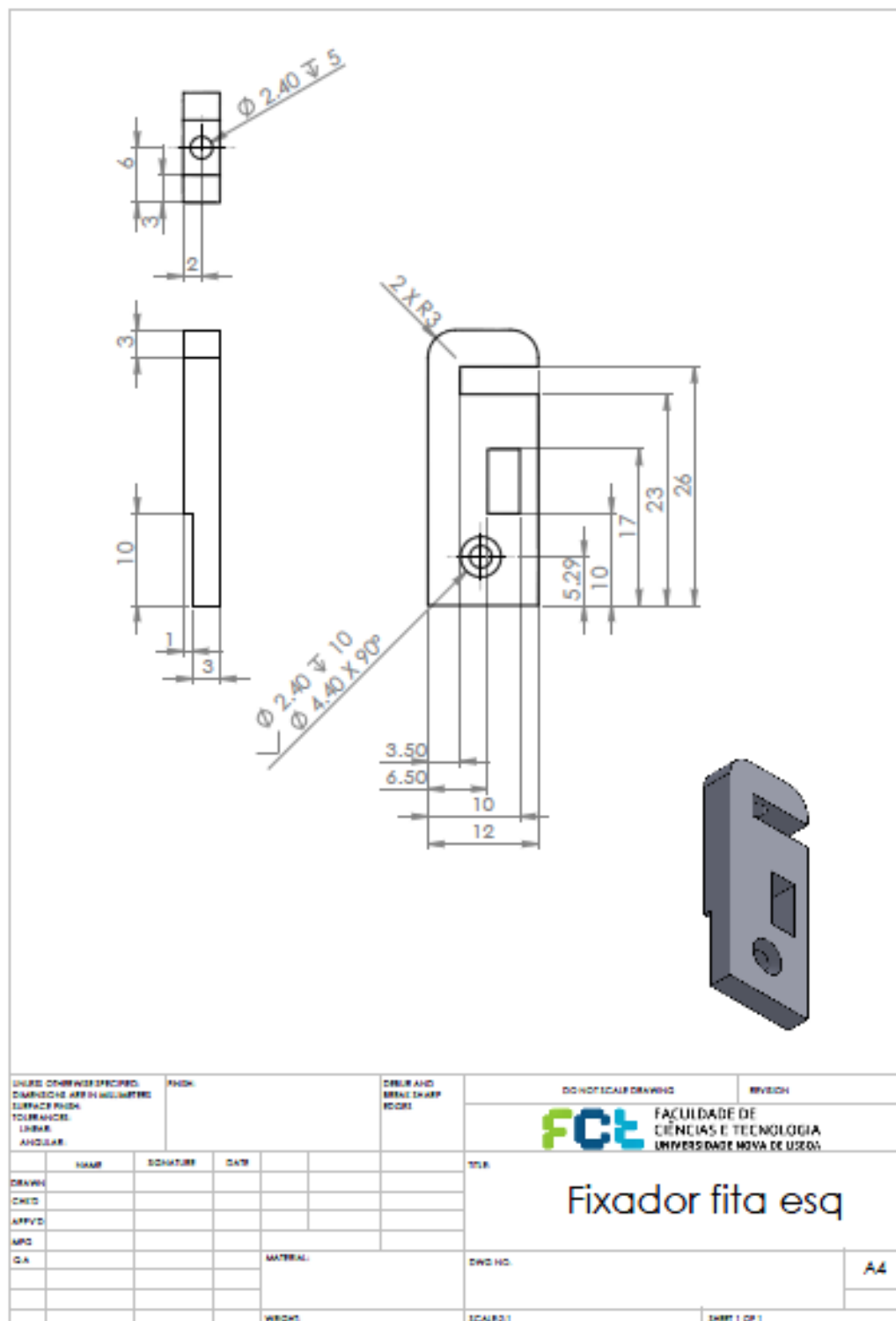


Figura A 10 - Desenho técnico do fixador da fita (esquerdo).

A2.5 Suporte Ficha de 9 Pinos

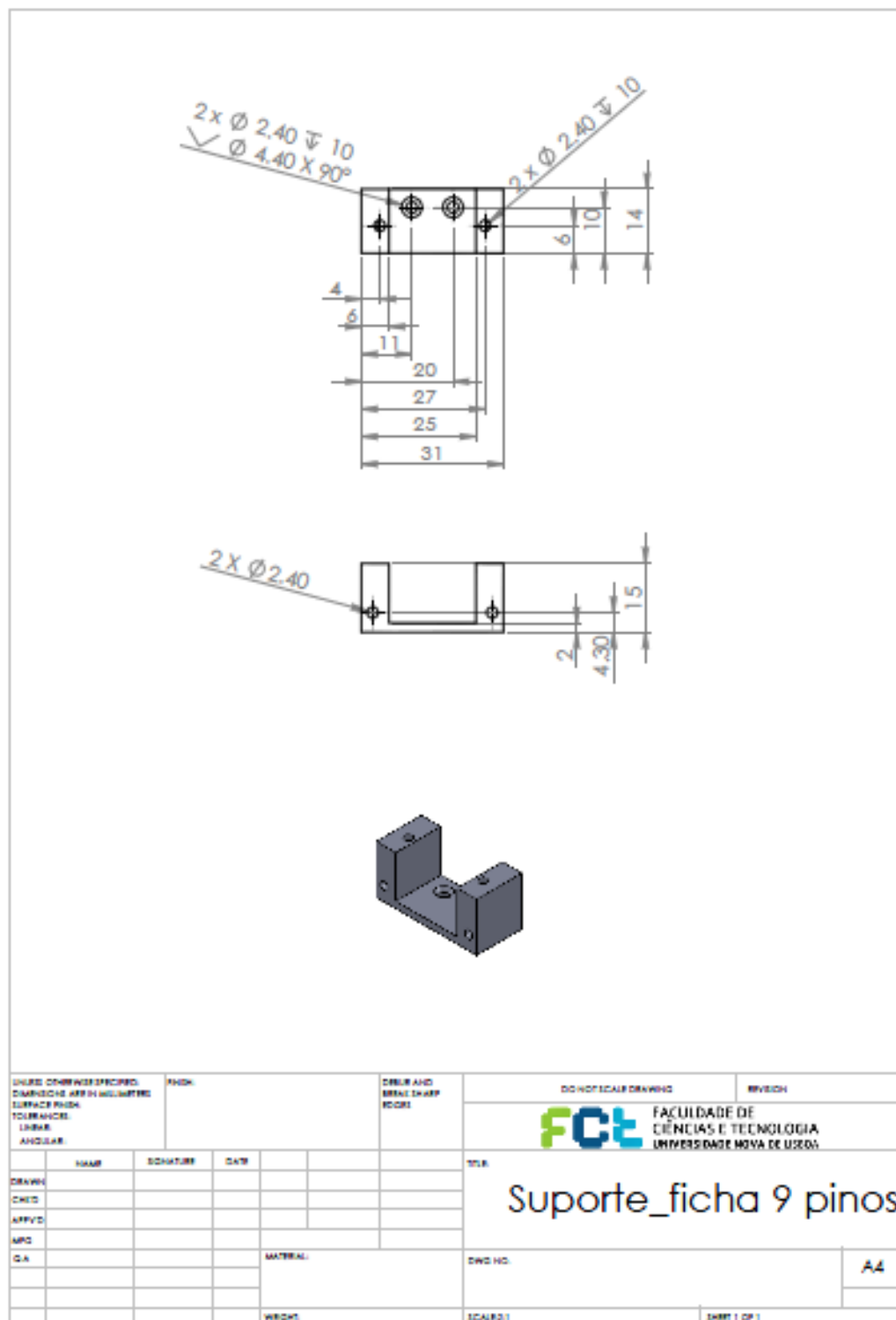


Figura A 11 - Desenho técnico do suporte da ficha de 9 pinos.

A3 - Desenhos Técnicos dos Componentes da Mesa Alpha

A3.1 Base

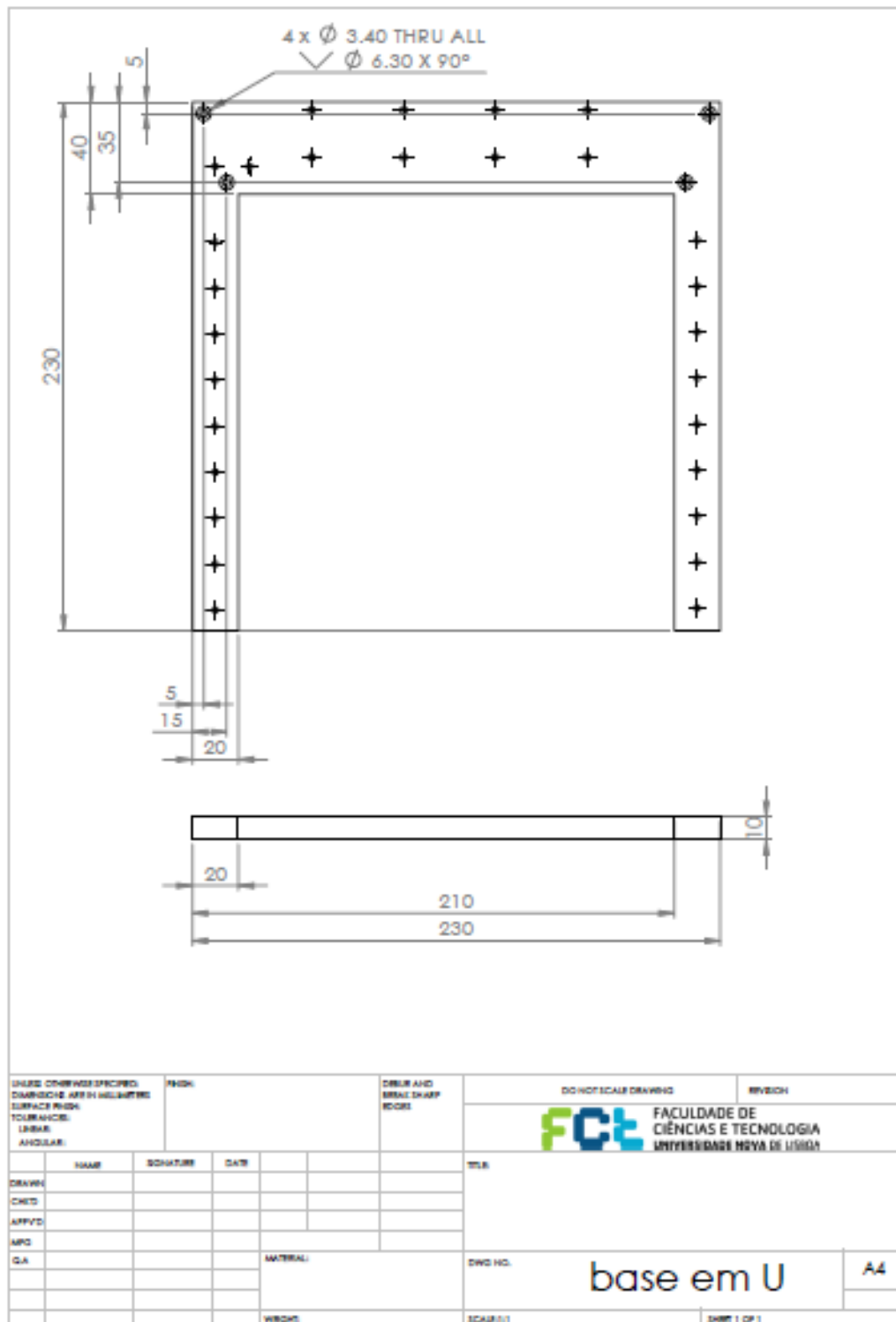


Figura A 12 - Desenho técnico da base.

A3.2 Espelho Vertical

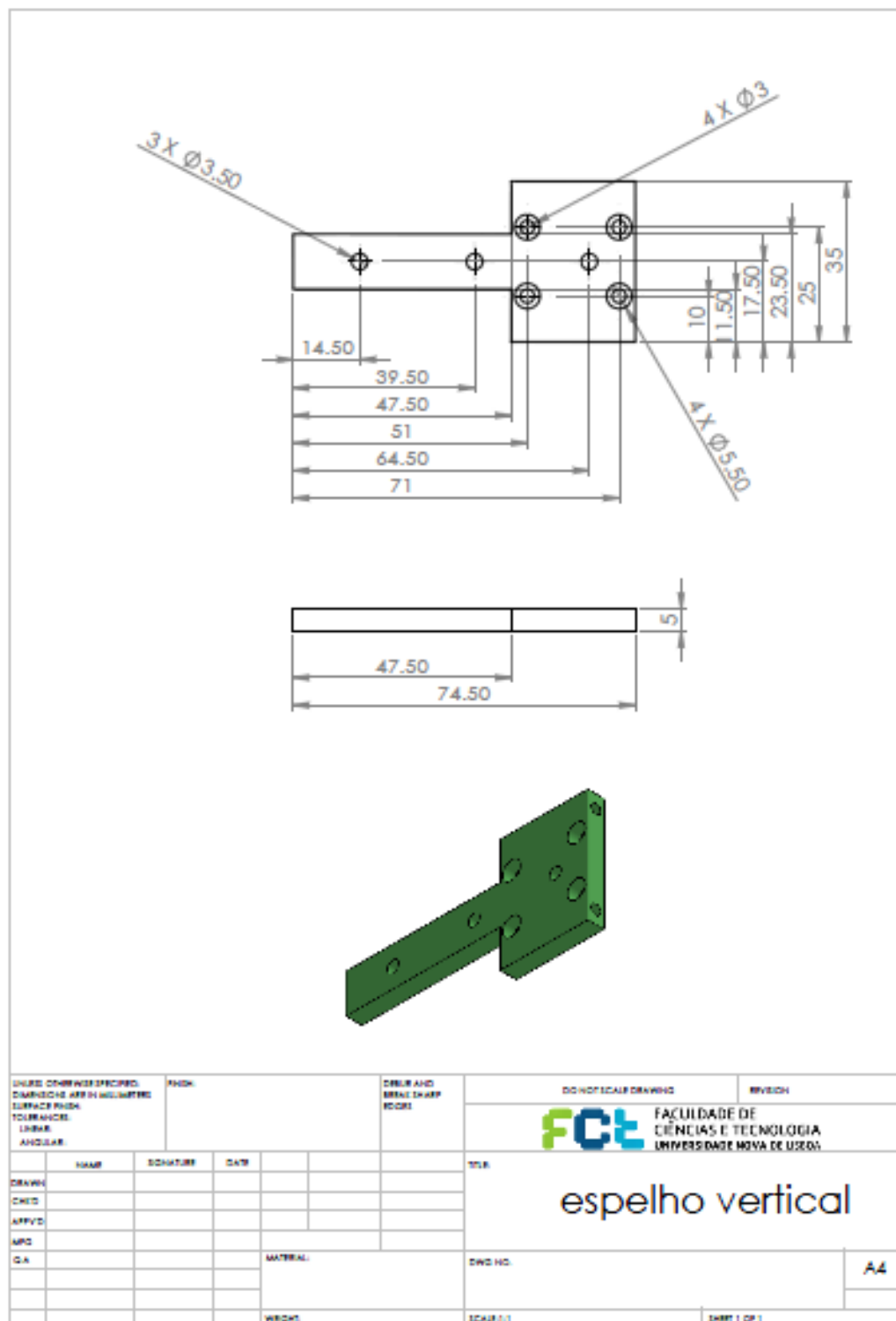


Figura A 13 - Desenho técnico do espelho vertical.

A3.3 Suporte do Motor

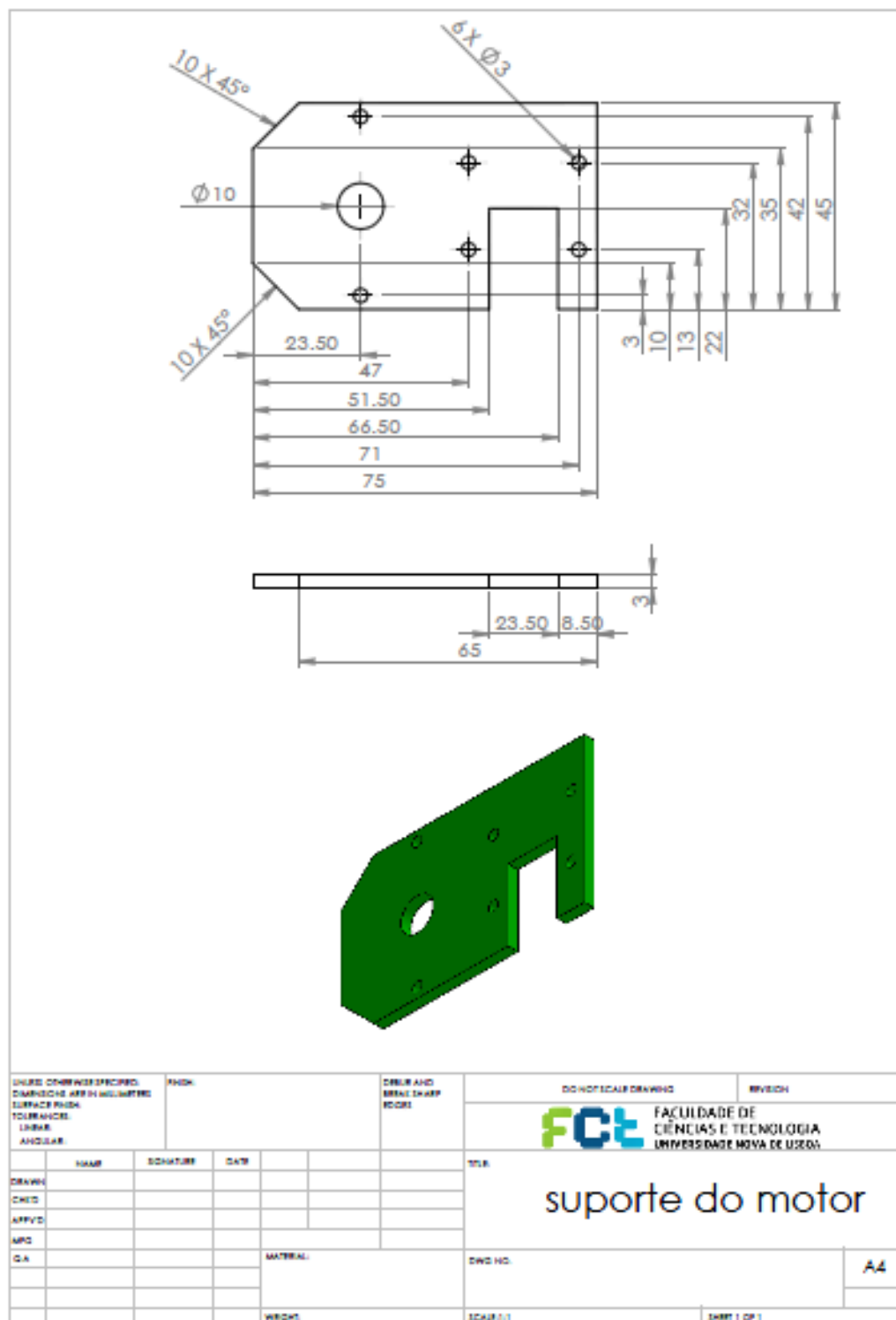


Figura A 14 - Desenho técnico do suporte do motor.

A3.4 Suporte do Barramento Vertical

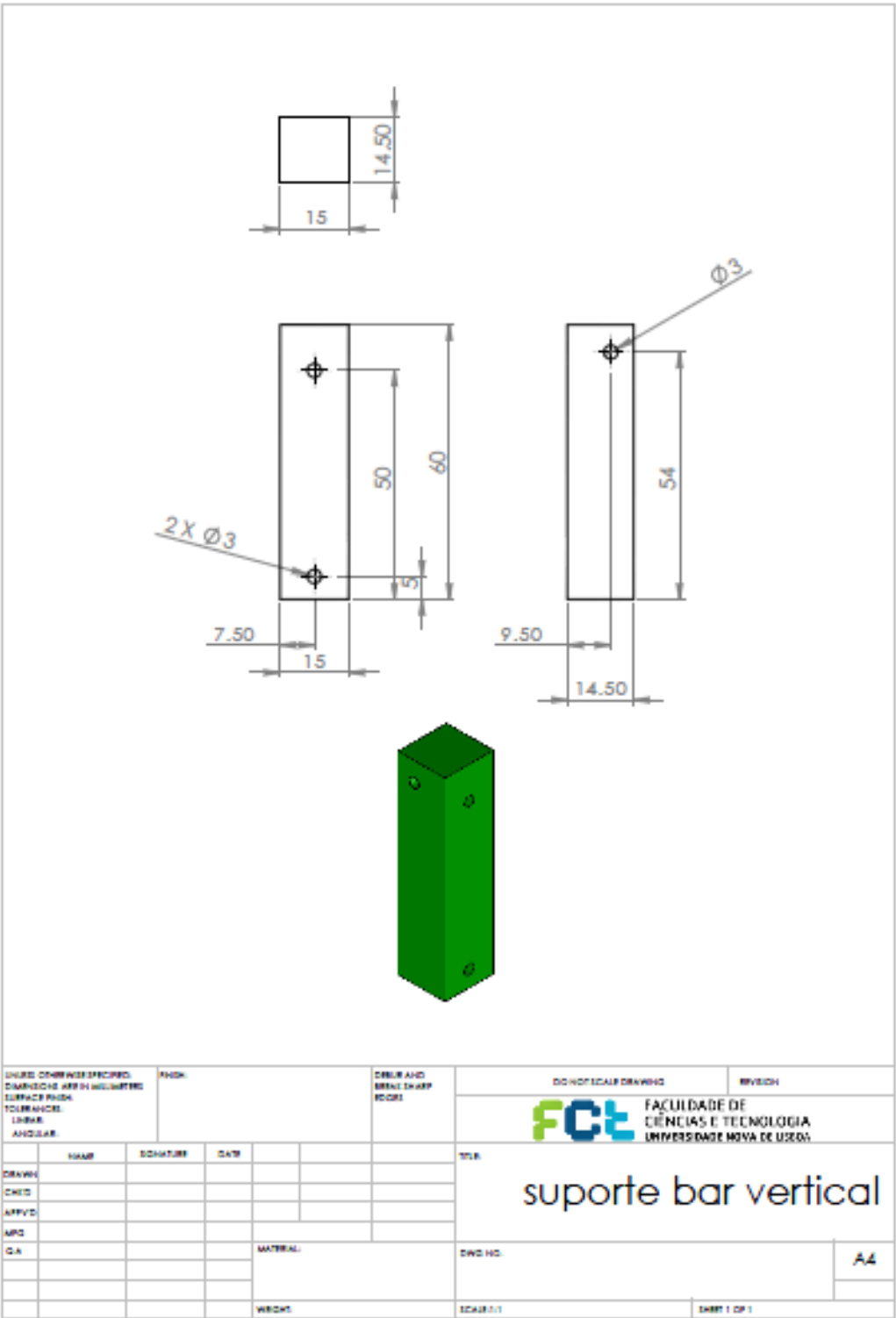


Figura A 15 - Desenho técnico do suporte do barramento vertical.

A3.5 Suporte do Fim de Curso

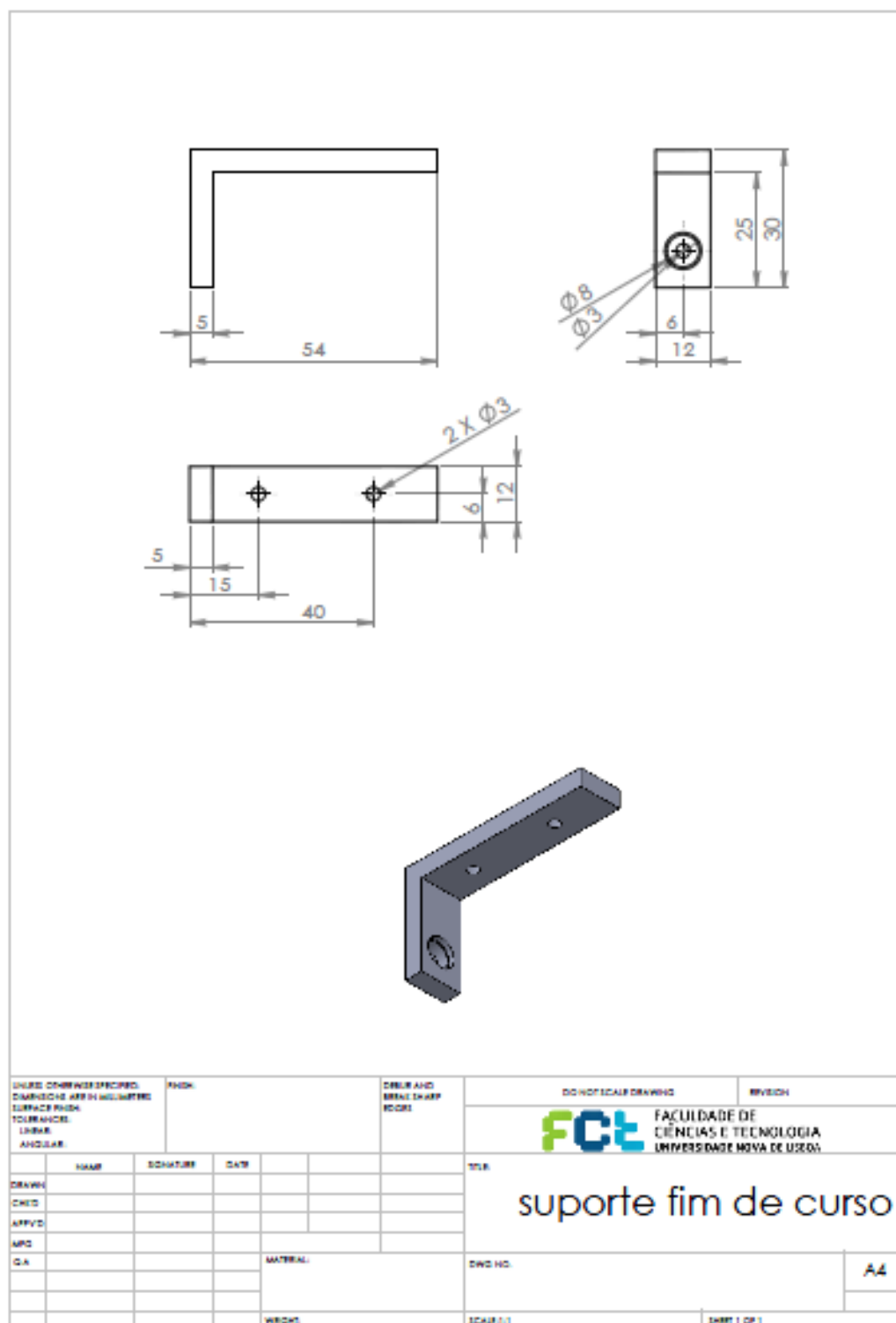


Figura A 16 - Desenho técnico do suporte do fim de curso.

A3.6 Suporte do Motor Vertical

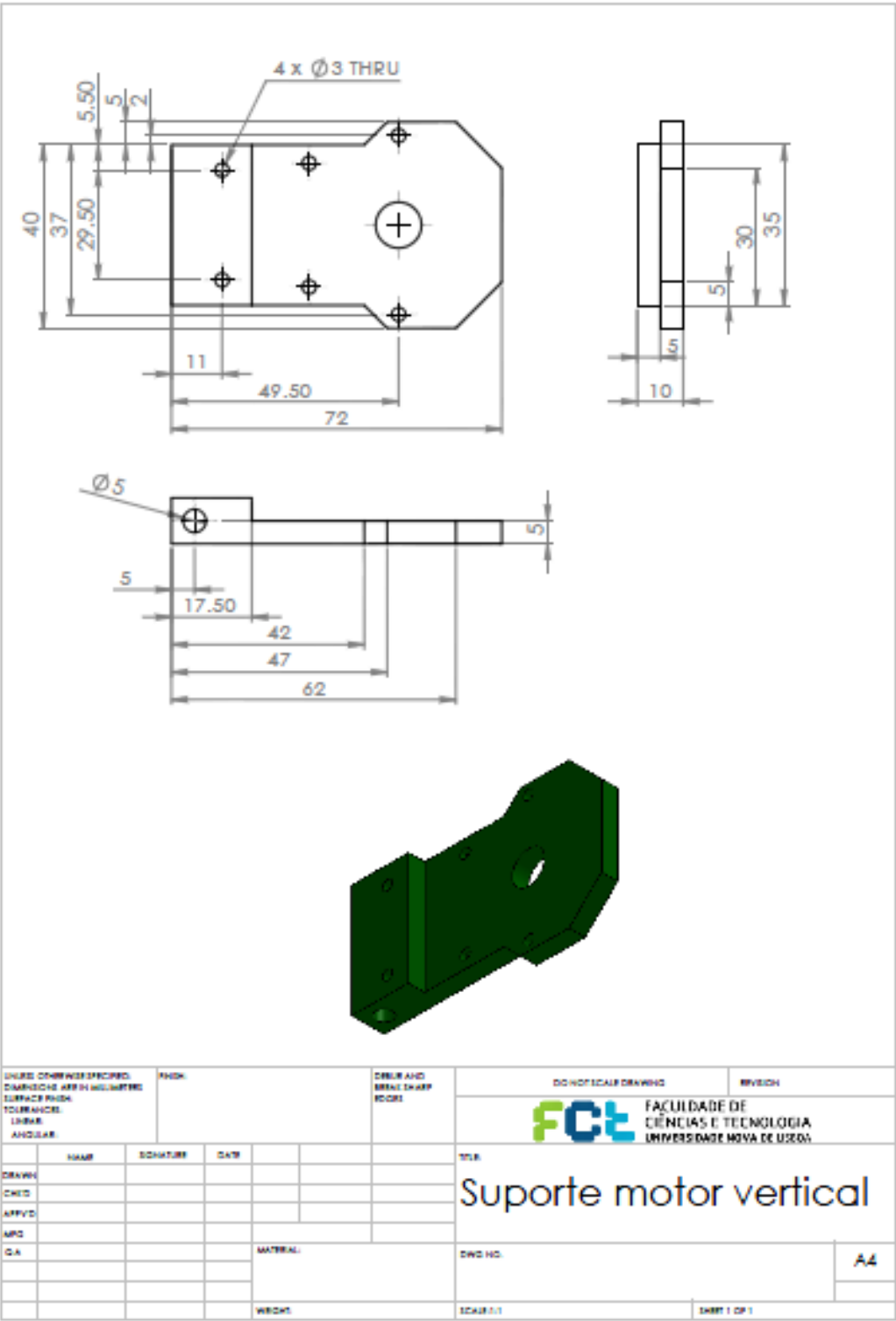


Figura A 17 - Desenho técnico do motor vertical.

A4 - Resultados dos Ensaios a Defeitos em Profundidade

A4.1 Inspeções de Topo

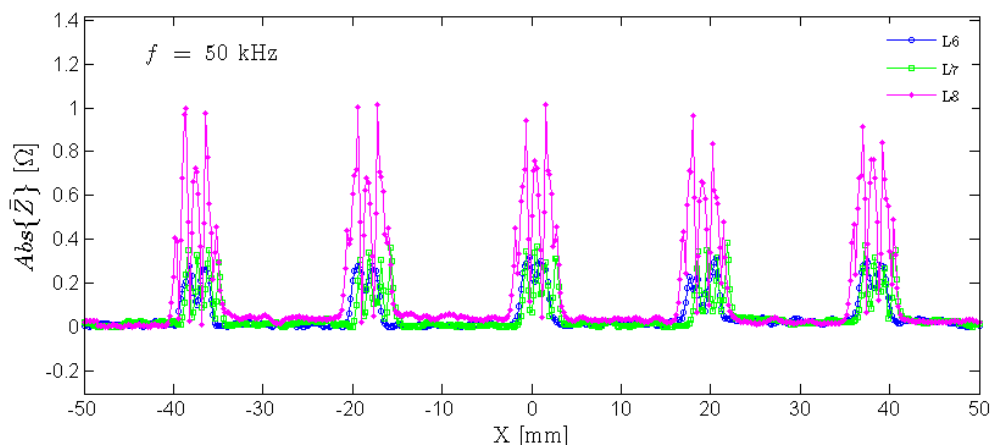


Figura A 18 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 50 \text{ kHz}$.

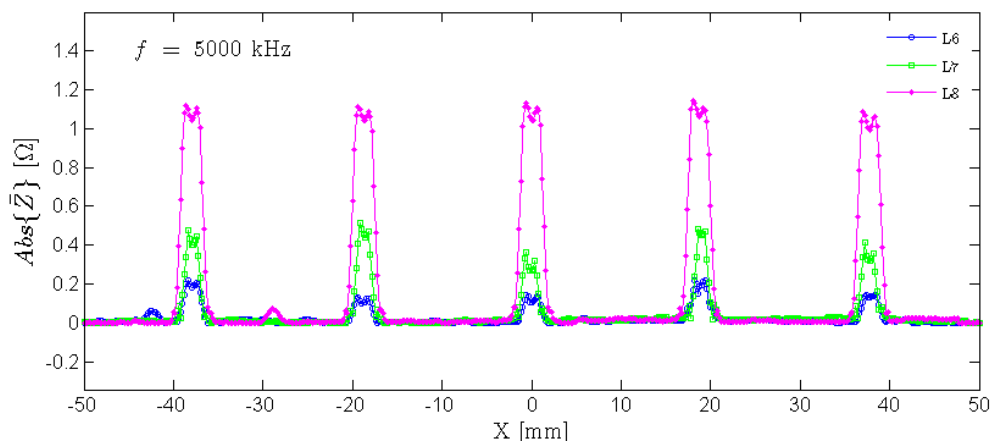


Figura A 19 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 5000 \text{ kHz}$.

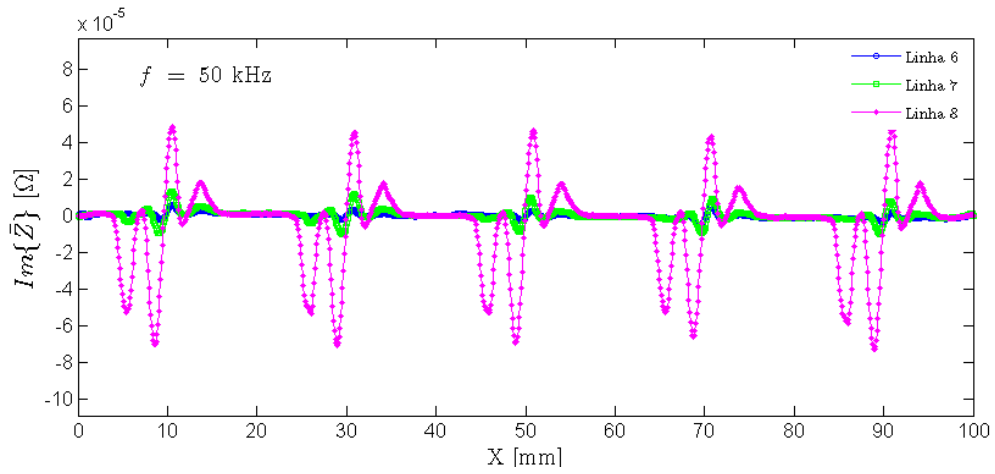


Figura A 20 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 50$ kHz.

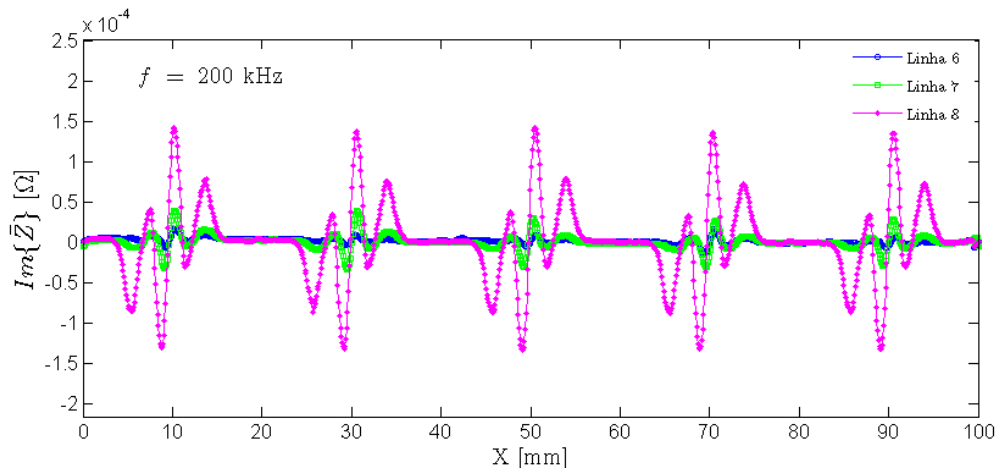


Figura A 21 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 na inspeção de topo sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6, 7 e 8 @ $f = 200$ kHz.

A4.2 Inspeções de Base

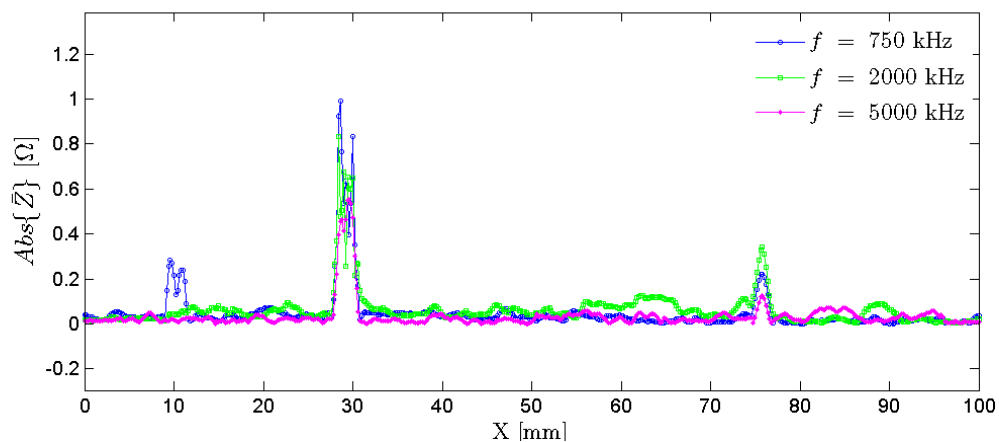


Figura A 22 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 @ $f = 750, 2000$ e 5000 kHz.

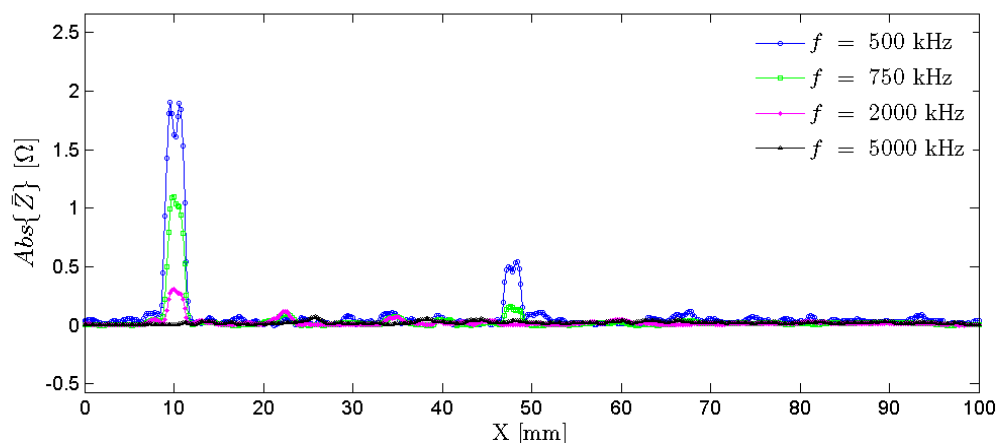


Figura A 23 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500, 750, 200$ e 5000 kHz.

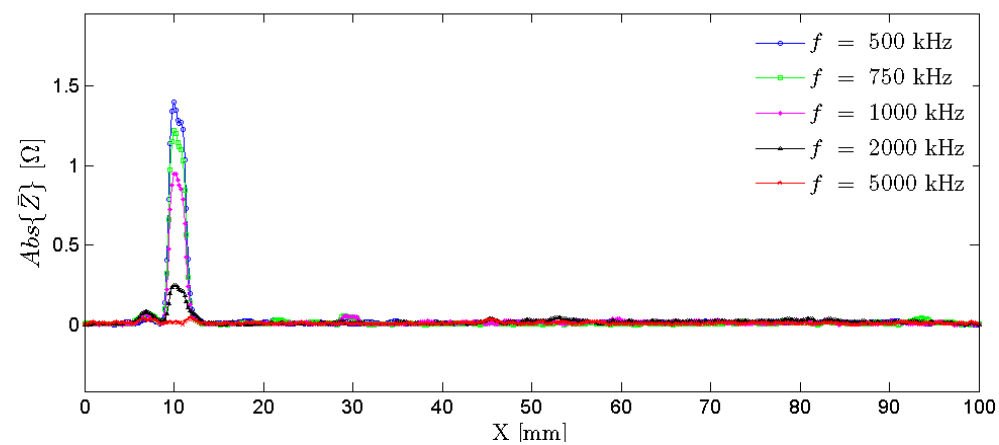


Figura A 24 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 @ $f = 500, 750, 1000, 2000$ e 5000 kHz.

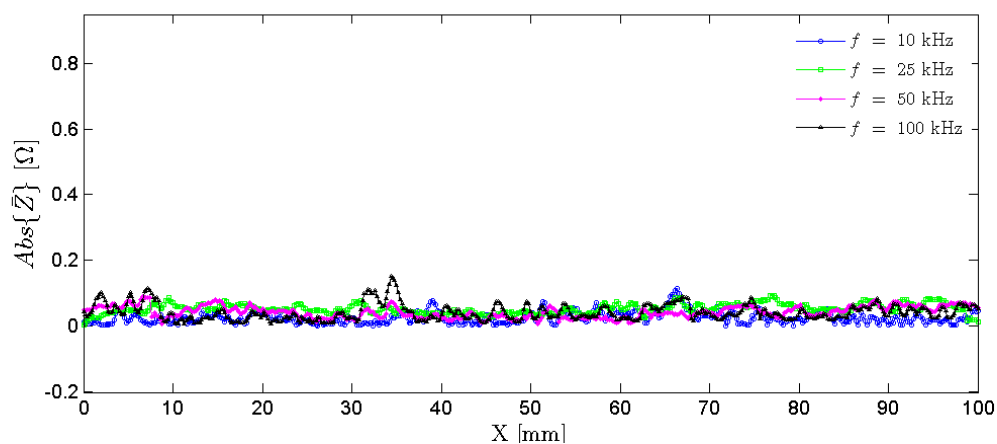


Figura A 25 - Resultado experimental da Sonda Pencil Probe sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 7 @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.

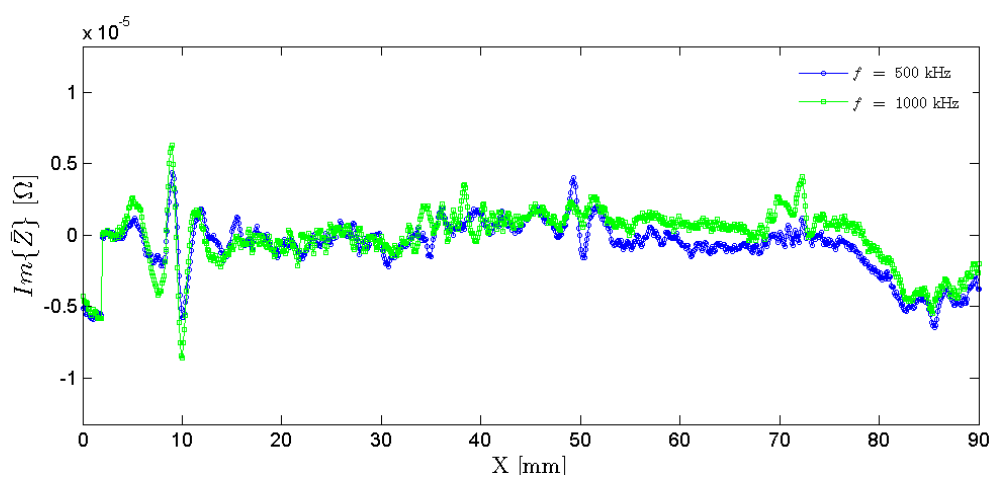


Figura A 26 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500$ e 1000 kHz.

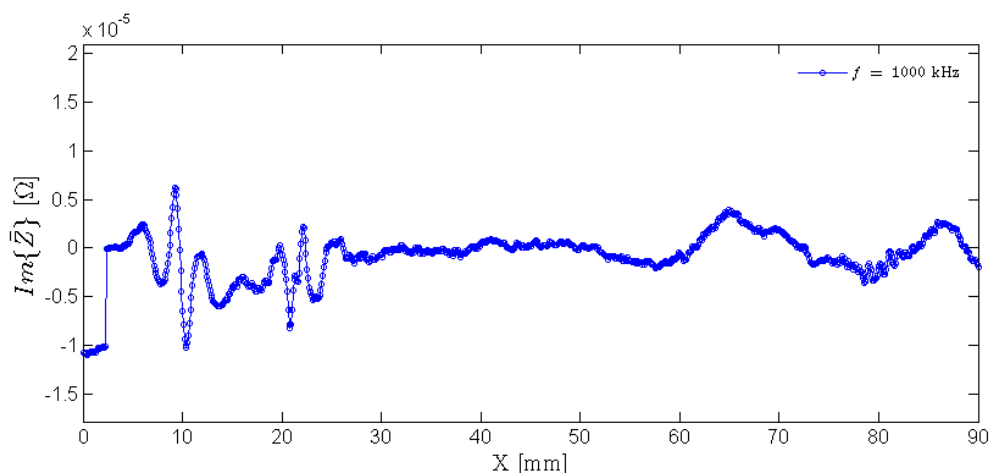


Figura A 27 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 @ $f = 1000$ kHz.

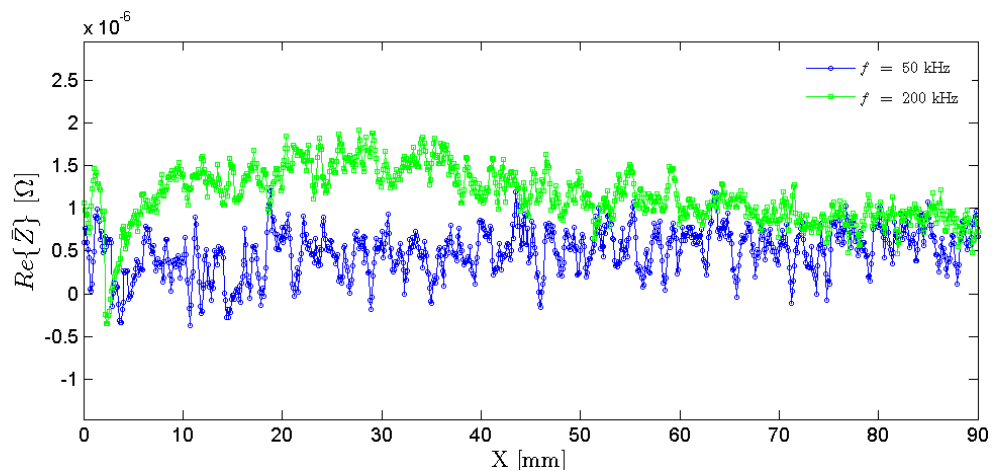


Figura A 28 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #2 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 @ $f = 50$, e 200 kHz.

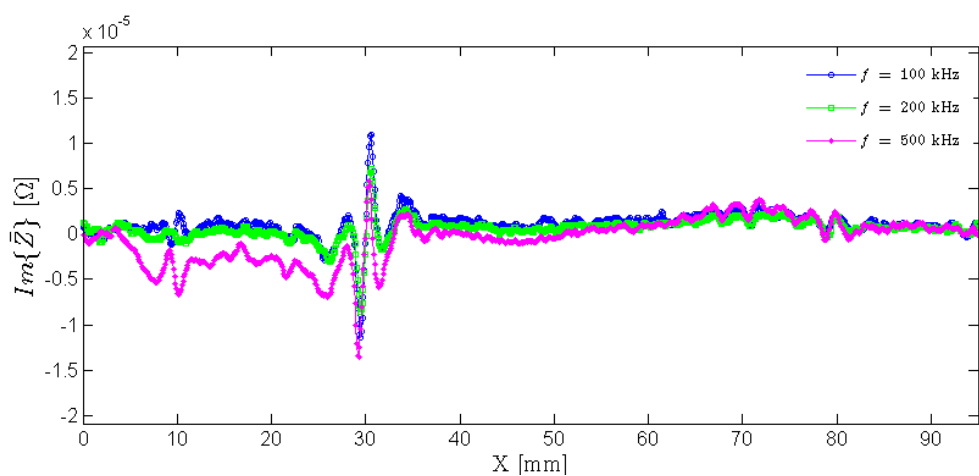


Figura A 29 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 @ $f = 100$, 200 e 500 kHz.

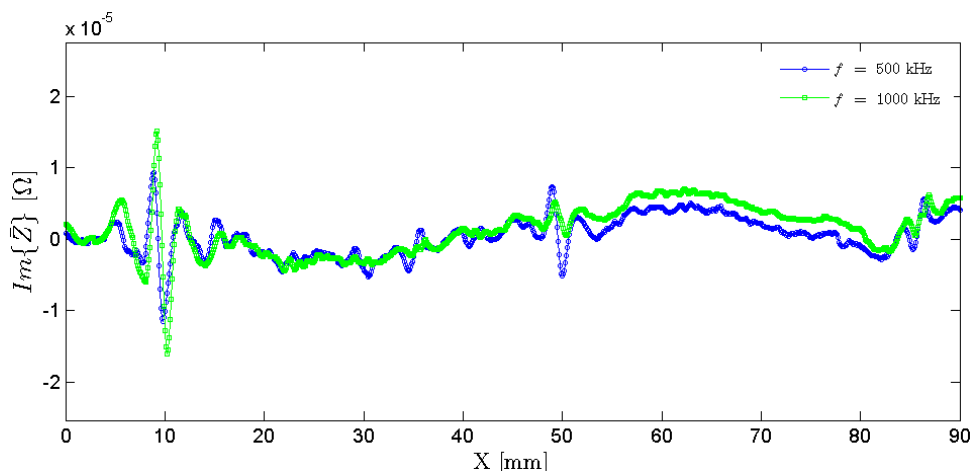


Figura A 30 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500$, e 1000 kHz.

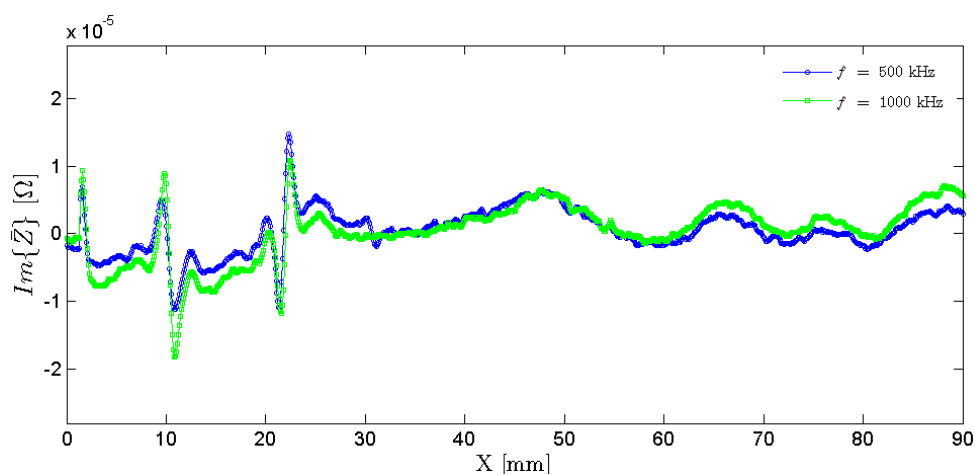


Figura A 31 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.

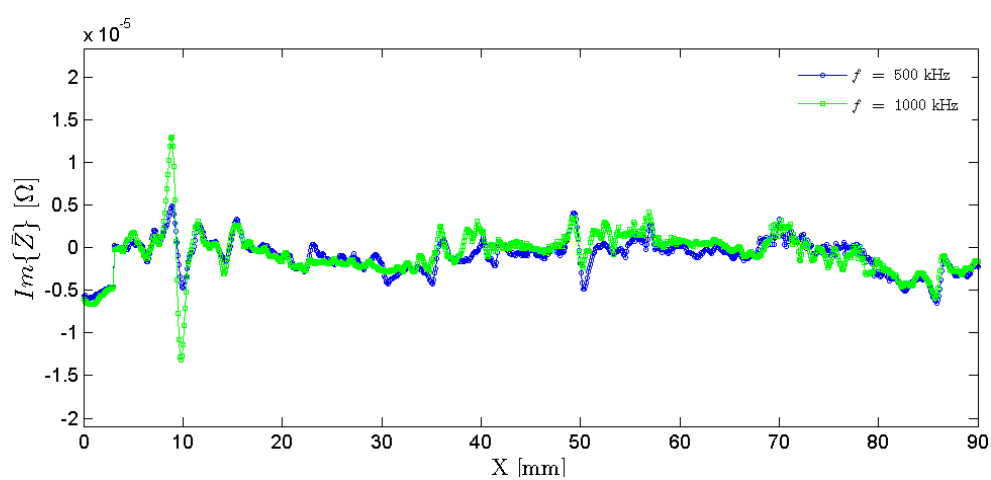


Figura A 32 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7 @ $f = 500$ e 1000 kHz.

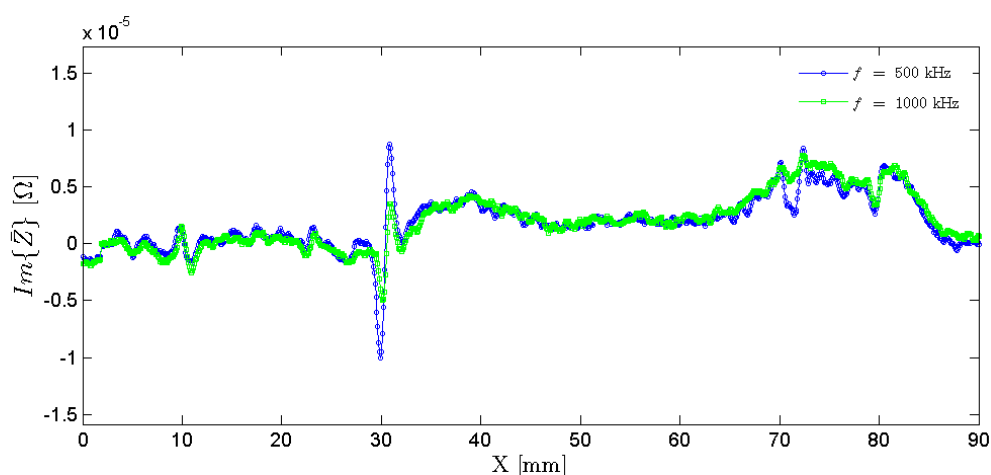


Figura A 33 - Resultado experimental da Sonda *IONIC* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8 @ $f = 500$ e 1000 kHz.

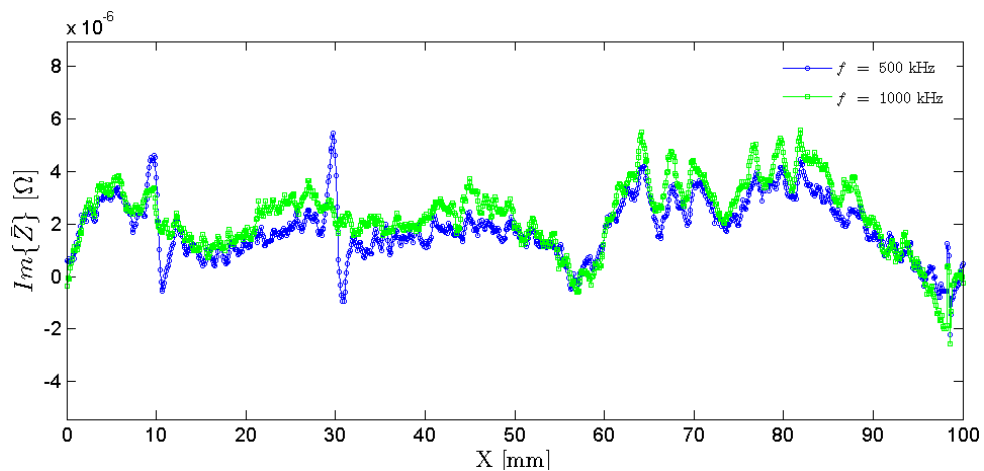


Figura A 34 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.

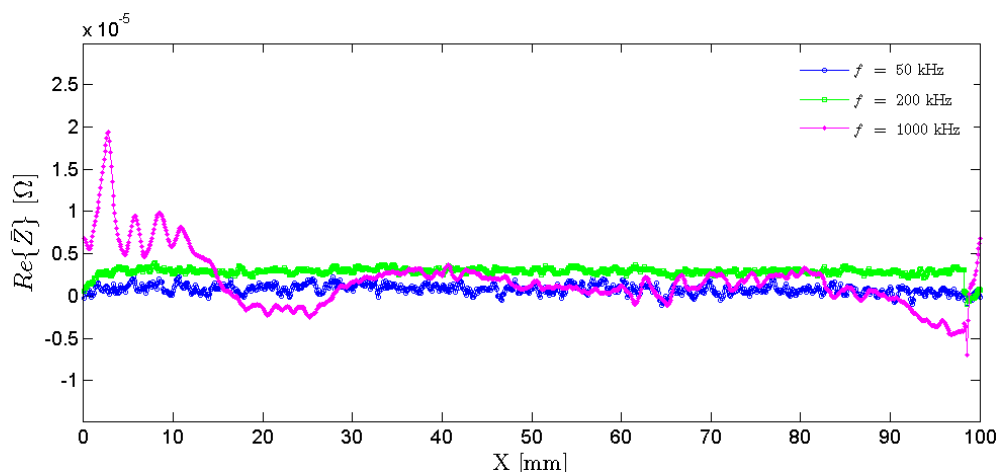


Figura A 35 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 @ $f = 50$, 200 e 1000 kHz.

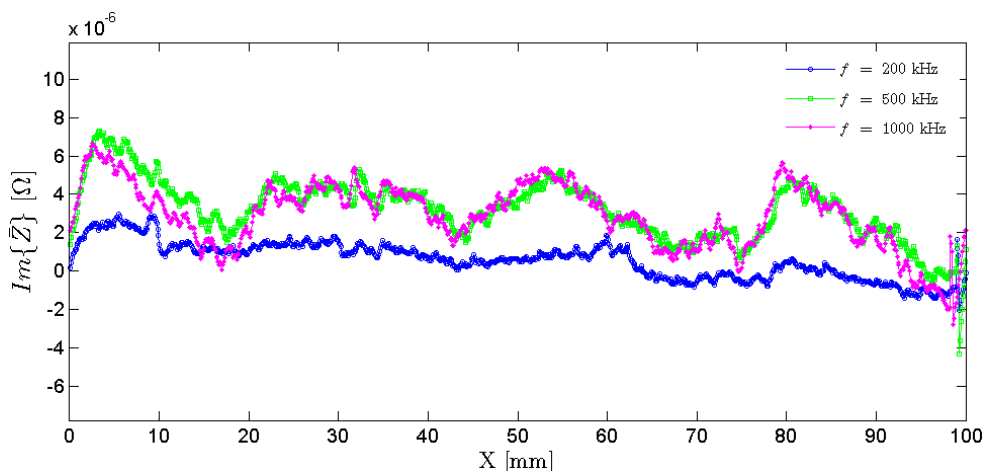


Figura A 36 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #12 sobre os defeitos padrão da chapa 3, linha 6 @ $f = 200$, 500 e 1000 kHz.

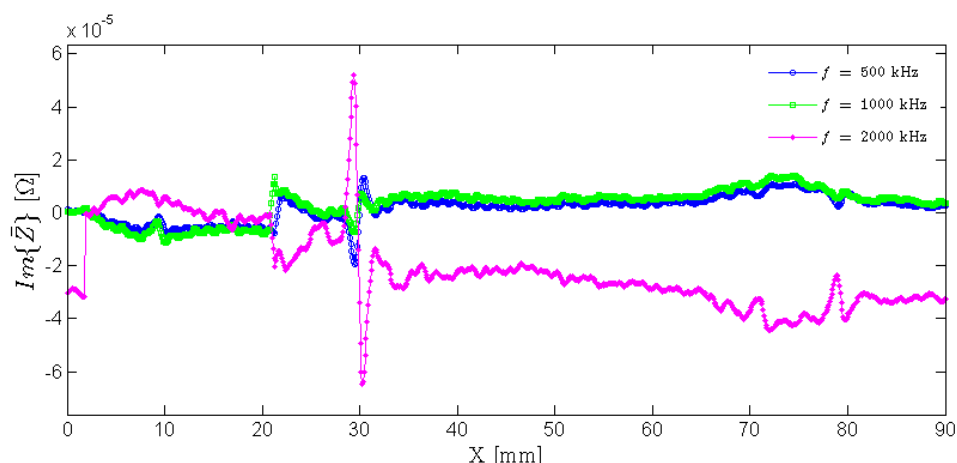


Figura A 37 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 6
@ $f = 500, 1000$ e 2000 kHz.

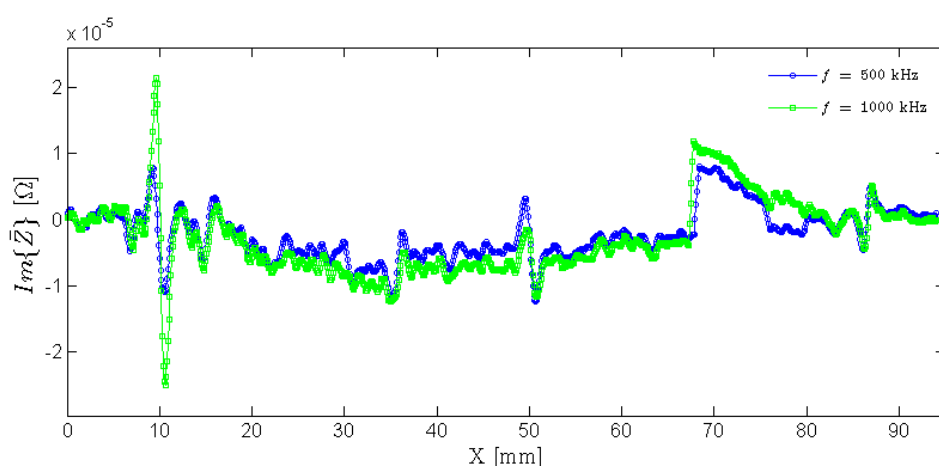


Figura A 38 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 7
@ $f = 500$ e 1000 kHz.

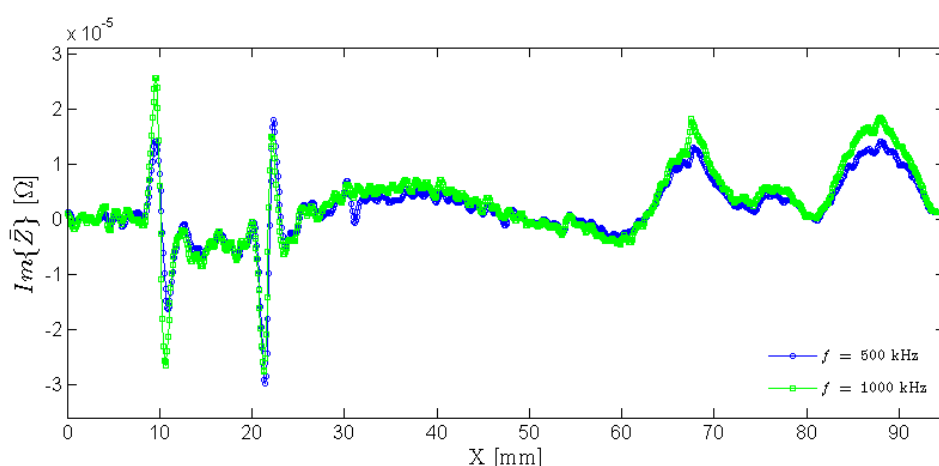


Figura A 39 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 1, linha 8
@ $f = 500$ e 1000 kHz.

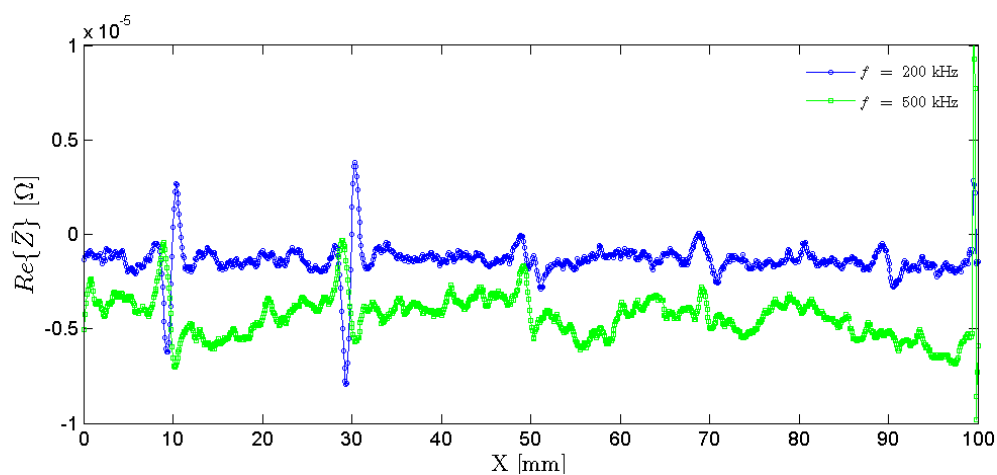


Figura A 40 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 200$ e 500 kHz.

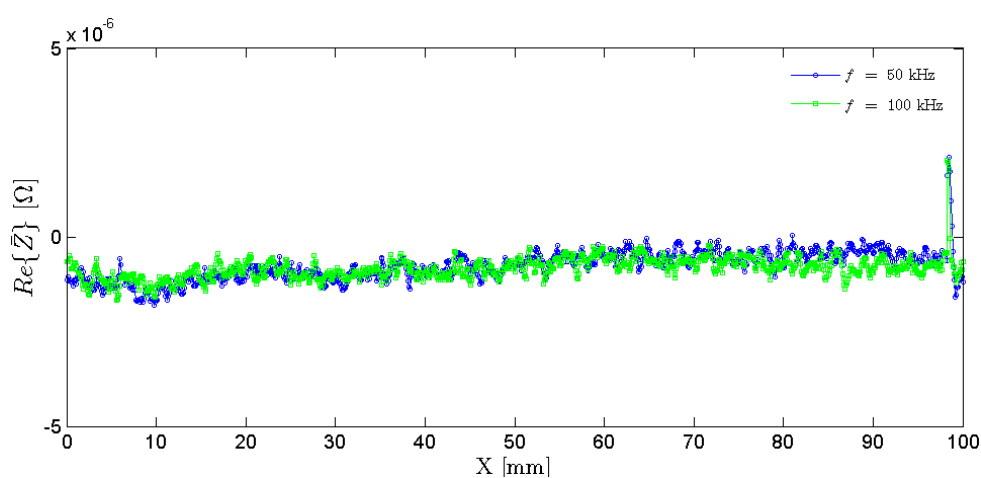


Figura A 41 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #13 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 7 @ $f = 50$ e 100 kHz.

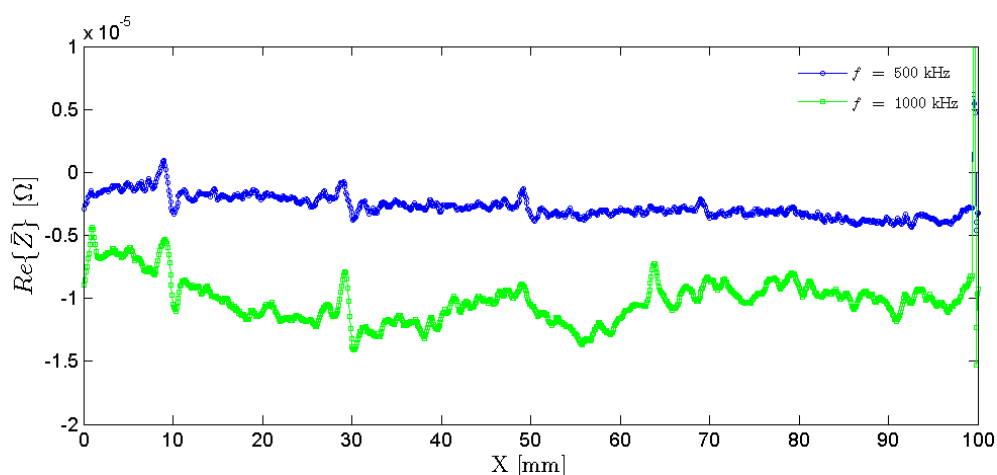


Figura A 42 - Resultado experimental da Sonda *IOnic* #14 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.

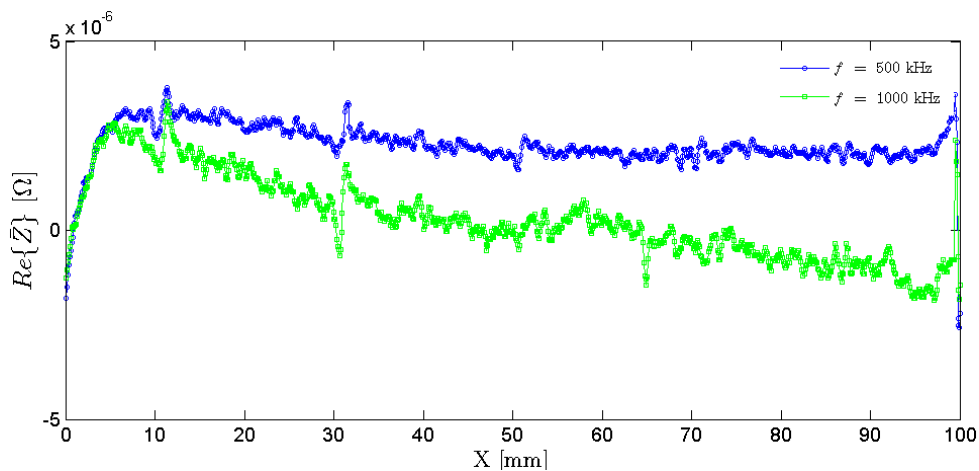


Figura A 43 - Resultado experimental da Sonda *IONic* AB4 sobre os defeitos padrão da chapa 2, linha 6 @ $f = 500$ e 1000 kHz.

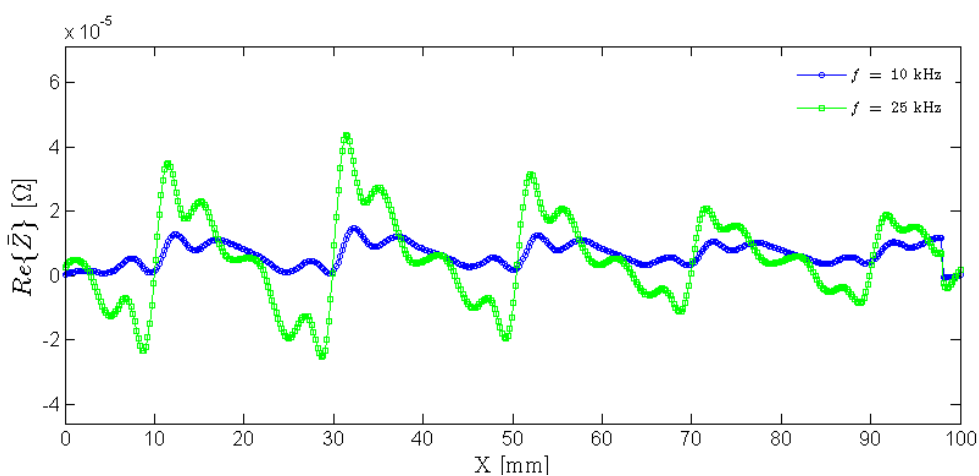


Figura A 44 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 6 @ $f = 10$ e 25 kHz.

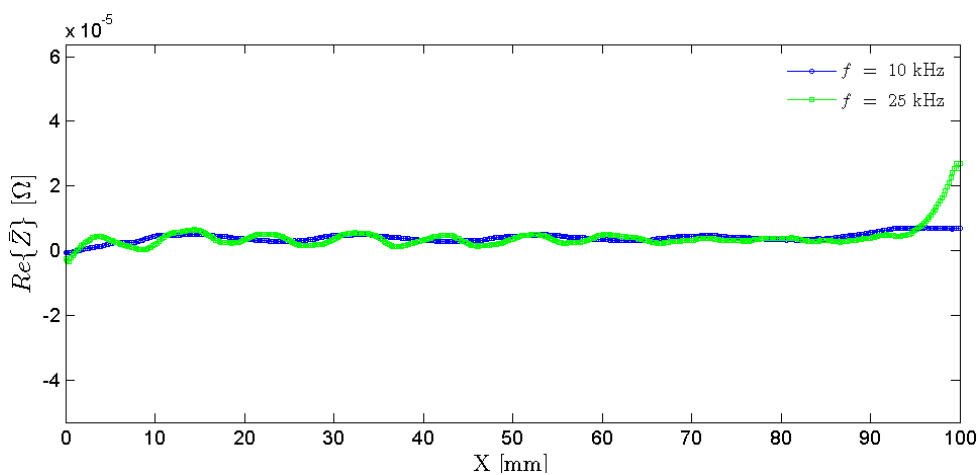


Figura A 45 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 7, linha 7 @ $f = 10$ e 25 kHz.

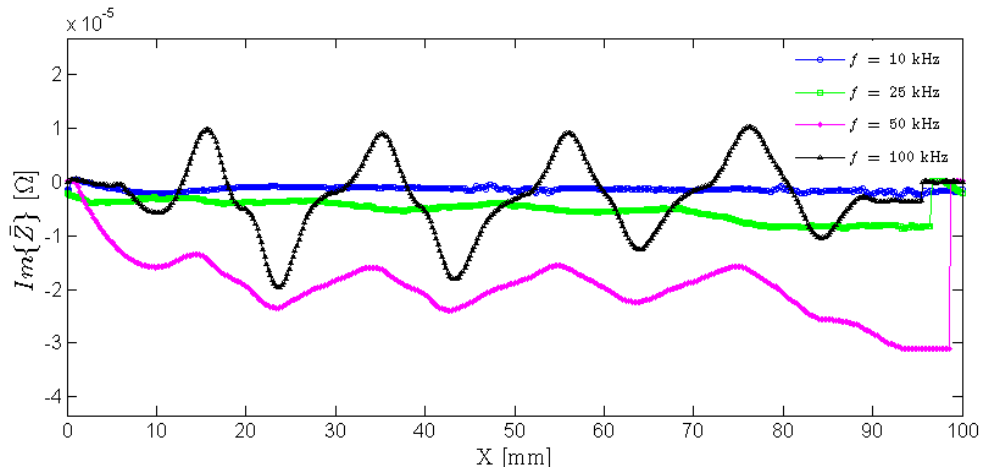


Figura A 46 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 7 @ $f = 10, 25, 50$ e 100 kHz.

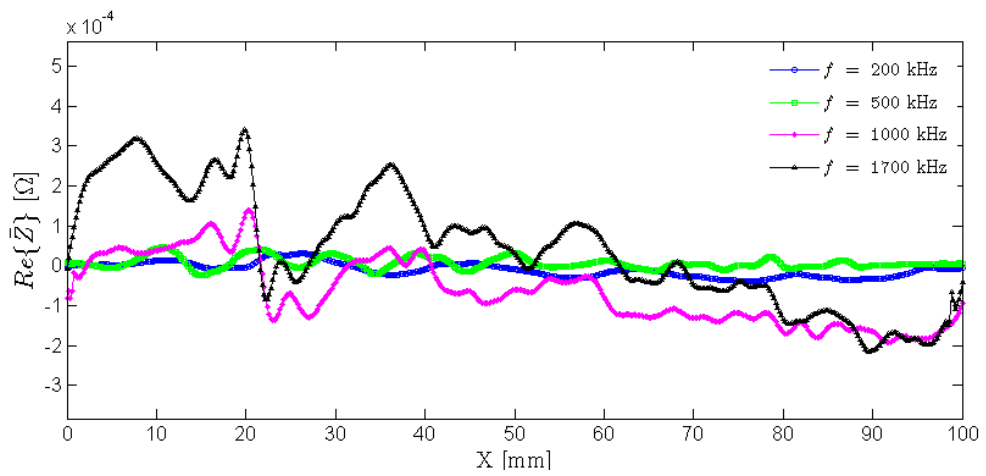


Figura A 47 - Resultado experimental da Sonda *IONic* com bobina sobre os defeitos padrão da chapa 9, linha 8 @ $f = 200, 500, 1000$ e 1700 kHz.

A5 - Resultados dos Ensaio a Defeitos Paralelos

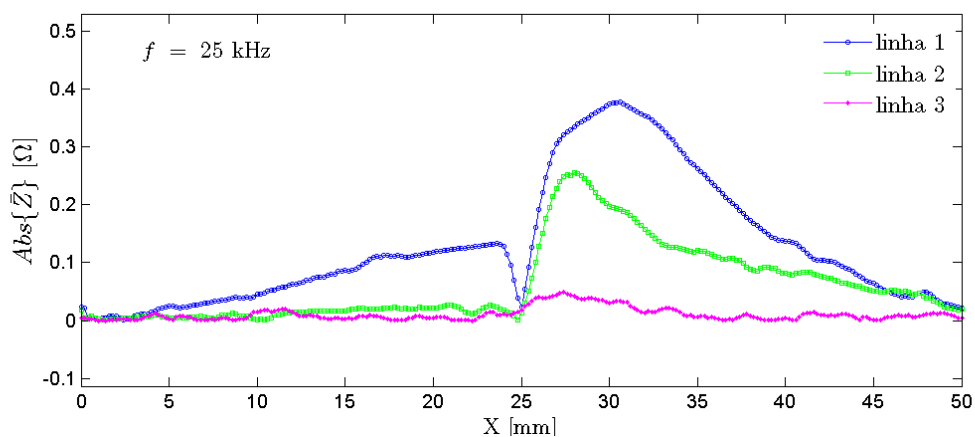


Figura A 48 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1, 2 e 3 @ $f = 25$ kHz.

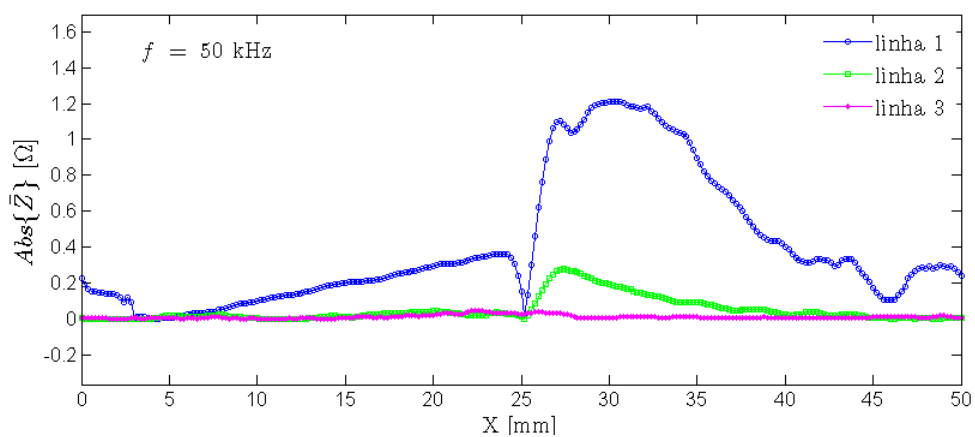


Figura A 49 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1, 2 e 3 @ $f = 50$ kHz.

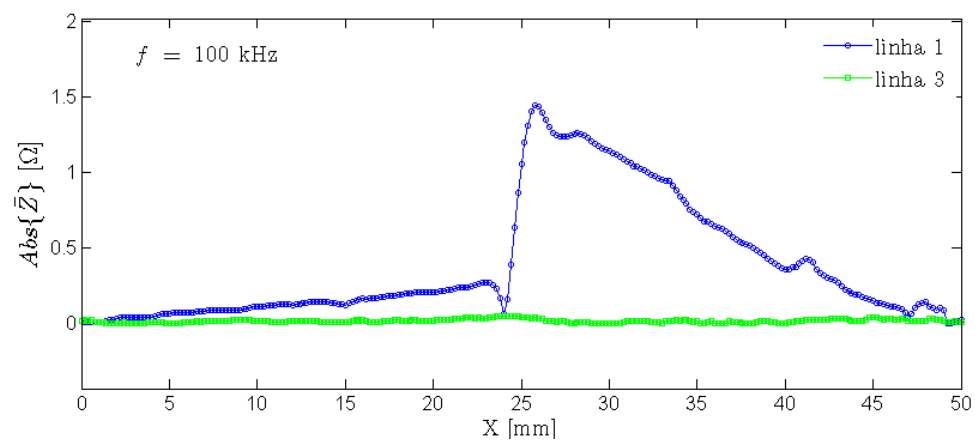


Figura A 50 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1 e 3 @ $f = 100$ kHz.

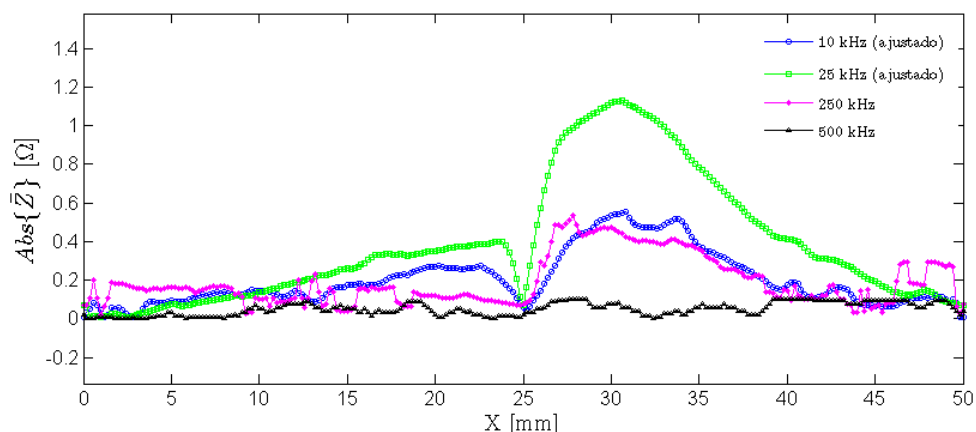


Figura A 51 - Resultado experimental da Sonda *Pencil Probe* sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 1 @ $f = 10, 25, 250$ e 500 kHz.

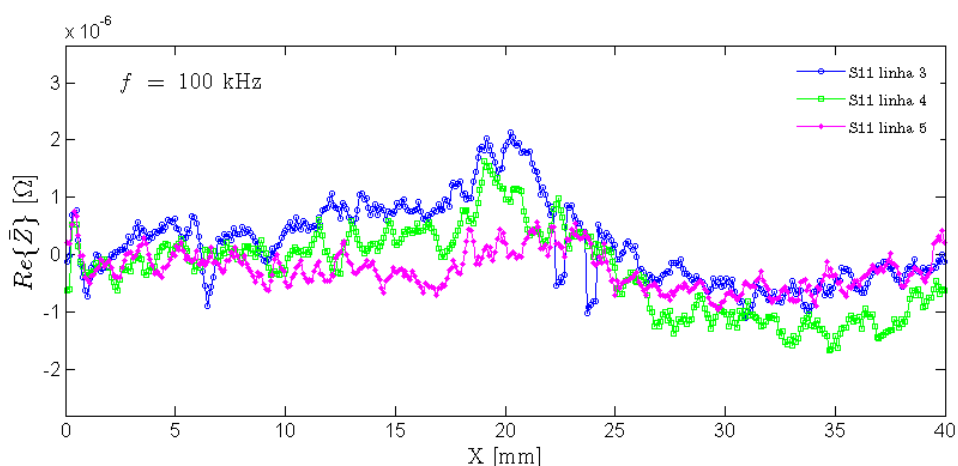


Figura A 52 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #11 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 3, 4 e 5 @ $f = 100$ kHz.

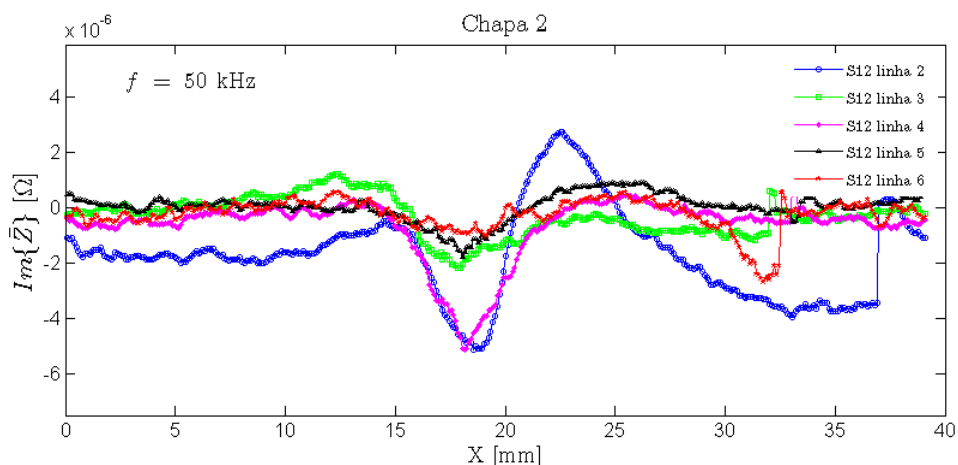


Figura A 53 - Resultado experimental da Sonda *IONic* #12 sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, 5 e 6 @ $f = 50$ kHz.

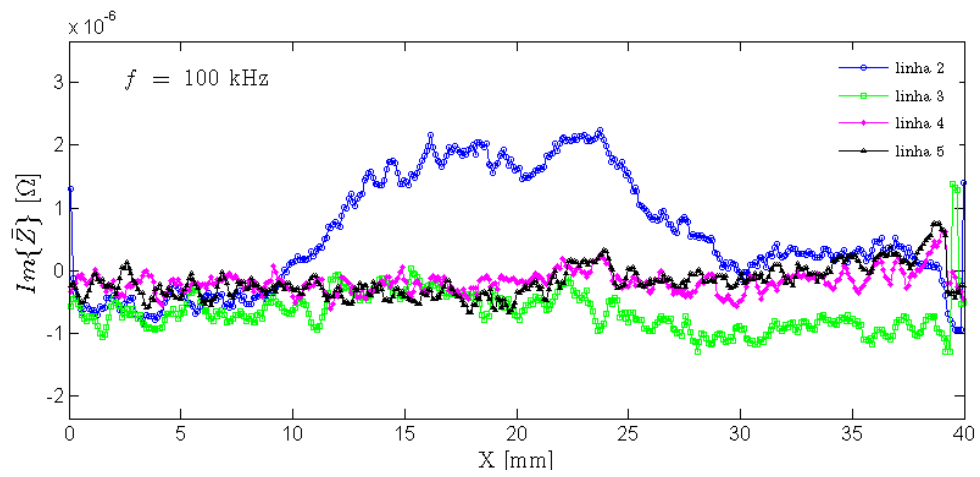


Figura A 54 - Resultado experimental da Sonda *Ionic* com bobina sobre o defeito paralelo do bloco 3, linha 2, 3, 4, e 5 @ $f = 100$ kHz.